Thèse de Doctorat

Pour obtenir le grade de Docteur de

L'UNIVERSITÉ POLYTECHNIQUE HAUTS-DE-FRANCE

Spécialité : Automatique

Présentée et soutenue par POKAM MEGUIA, Raissa

Le 31/08/2018, à Valenciennes

École doctorale : Sciences Pour l'Ingénieur (ED SPI 072)

Laboratoire : Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines (LAMIH-UMR CNRS 8201)

Conception d'une interface avec Réalité Augmentée pour la conduite automobile autonome

JURY

Président du jury

- Jean-Christophe POPIEUL, Professeur au LAMIH UMR CNRS 8201, Université Polytechnique des Hauts-de-France.

Rapporteurs

- Bernard RIERA, Professeur au Crestic, Université de Reims.
- Jordan NAVARRO, HDR à l'EMC, Université Lumière Lyon 2.

Examinateurs

- Philippe CHEVREL, Professeur au LS2N UMR CNRS 6004, Université de Nantes.
- Jean-François FORZY, Docteur- Ingénieur, Renault

Co- Directeur de thèse : Serge DEBERNARD, Professeur au LAMIH UMR CNRS 8201, Université Polytechnique des Hauts-de-France.
Co- Directeur de thèse : Christine CHAUVIN, Professeur au Lab-STICC, UMR CNRS 6285, Université de Bretagne Sud

Membre invité

- Sabine LANGLOIS, Ingénieure, Renault, co-encadrante.

« À quelle grande œuvre n'y a-t-il pas des difficultés qui d'abord, et de loin, commencent par paraître insurmontables, et qui ensuite, et de près, finissent par s'aplanir insensiblement ? Si les grandes œuvres n'étaient pas difficiles à exécuter, où donc seraient le mérite de les entreprendre et la gloire de les accomplir ? »

Émile de Girardin (Les pensées et maximes, 1867)

« J'ai appris que le succès ne doit pas être mesuré par la position qu'on a atteint dans la vie, mais par les obstacles qu'on a dû surmonter, tout en essayant de réussir. »

Booker T. Washington

Résumé

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'un projet intitulé *Localisation et Réalité Augmentée (LRA)*. Mettant en relation plusieurs structures industrielles et universitaires, ce projet était appliqué à la fois au domaine ferroviaire et aux voitures autonomes. Elle aborde trois questions principales relatives à la conception des interfaces Humain-Machine dans les voitures autonomes : quelles informations faut-il présenter au conducteur ? Sous quelle forme ? À quel moment ou dans quel contexte ? Elle vise, au travers des réponses apportées à ces questions, à rendre le système « transparent », de façon à susciter une calibration de la confiance appropriée du conducteur en la voiture autonome mais aussi à susciter une expérience utilisateur satisfaisante. Nous nous sommes focalisés en particulier sur la tâche de changement de voie réalisée entièrement réalisée par la voiture autonome.

Pour atteindre cet objectif, nous avons déployé une méthodologie comportant cinq étapes. Sur la base du modèle de LYONS (2013), des principes généraux de transparence ont été définis, et ont ensuite été opérationnalisées grâce à la démarche *Cognitive Work Analysis*. La forme des informations utiles ou potentiellement utiles au conducteur a été définie lors de de séances de créativité et en utilisant la Réalité Augmentée qui est au cœur du projet LRA. Ces informations ont été catégorisées selon les différentes fonctions dont elles résultent (prise d'information, analyse de l'information, prise de décision, implémentation de l'action). Cinq interfaces ont été conçues ; elles présentent des informations relevant de tout ou partie de ces 4 catégories. Elles représentent donc des niveaux de transparence plus ou moins élevés. La validité des principes de transparence a été éprouvée grâce à une expérimentation menée sur simulateur, auprès d'un échantillon de 45 personnes, durant laquelle différents indicateurs des activités cognitives et de l'Expérience Utilisateur ont été mesurés.

L'analyse de ces données conduit à mettre en évidence des différences entre les cinq interfaces. L'interface présentant les informations issues des fonctions « prise d'information » et « implémentation de l'action » facilite les activités cognitives du conducteur/ Superviseur. Du point de vue de l'Expérience Utilisateur, c'est l'interface présentant toutes les catégories d'informations qui s'est distinguée des autres.

Mots-clés : automatisation, Réalité Augmentée, transparence

Abstract

This doctoral thesis was conducted under the canopy of the *Localization and Augmented Reality (LAR) project.* The research project was focused on railway yard and autonomous vehicles. The thesis provides answers to three main questions about the Human-Machine interface design in autonomous vehicles: *Which information should be conveyed to the human agent? In which form? And when?* Answers will enable an appropriate trust calibration of the human agent in the autonomous vehicle and improve driver's experience by making automation "transparent". We focus especially on the lane changing task entirely realized by the autonomous vehicle.

The aim and the objectives were achieved by a five-steps methodology. Some general principles of transparency have been redefined on the LYONS (2013) model. These principles have been then operationalized by means of Cognitive Work Analysis. Graphical representation of useful information or potentially useful information was defined during creative sessions, by using Augmented Reality that lies at the heart of the LAR project. This information was categorized according to the functions from which it results: information acquisition, information analysis, decision making and action execution. Five interfaces were designed. Each of these interfaces presents information from some of these functions. Therefore, these interfaces corresponded to different transparency configurations more or less high. The validity of transparency principles was tested through an experiment on driving simulator with a sample of 45 participants. In this experiment, some indicators of cognitive activities and User Experience were measured.

Data analysis has led to some differences between 5 interfaces. Indeed, the interface with related information to "information acquisition" and "action execution" functions improves the cognitive activities of the human agent. Considering the User Experience, it is the interface with the information related from the 4 functions which provides the best User Experience.

Key words: automation, Augmented reality, transparency

Remerciements

Cette thèse a pu être menée jusqu'au terme grâce au soutien de plusieurs personnes. De prime abord, je remercie le professeur. Serge DEBERNARD pour m'avoir accueilli au sein du LAMIH et pour tous les conseils prodigués au cours de ce travail de recherche. Ses retours critiques dans la dernière ligne droite m'ont poussé à faire preuve de plus de pédagogie dans l'explicitation de mes travaux de recherche. Je remercie la Professeure Christine CHAUVIN pour sa disponibilité et ses relectures minutieuses. Sa rigueur a été pour moi un appel à fournir davantage d'efforts pour un travail de qualité. Je ne saurais oublier Mme Sabine LANGLOIS qui a été un chef de projet exemplaire. Sa diligence à organiser des points téléphoniques systématiques a été d'une aide incommensurable. Prévenante, m'encourageant à ne pas lâcher dans mes moments de découragement, quelques mots ne sauraient suffire pour lui exprimer ma reconnaissance. Je remercie également Pierre Loslever pour son aide à l'analyse statistique des résultats de la validation expérimentale. Son approche analytique et sa rigueur m'ont aidé à interroger davantage les données.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury. Je remercie en particulier le professeur Jean-Christophe POPIEUL d'avoir accepté d'être le président du jury. Mes remerciements vont également à l'endroit de M. Jordan NAVARRO et du Professeur Bernard RIERA pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse. Je ne saurais oublier le professeur Philippe CHEVREL et M. Jean-François FORZY qui m'ont fait l'honneur d'être les examinateurs de cette thèse.

Le cadre de travail au cours de ces travaux de recherche a été l'Institut de Recherche Technologique (IRT) SystemX. Que de bons moments avec les collègues du projet Localisation et Réalité Augmentée : M. Vincent DELAHAYE, Mme Sandra DAUSEND, M. Romain RICHARD, M. Chunshi GUO et tous les autres. L'ajout des mots dans notre ergo-dictionnaire était un exutoire durant les périodes où je n'avançais pas comme je voulais. Merci à vous ! Les sorties en équipe ont été également un bon moyen pour moi de déstresser. Je ne saurais oublier les membres de l'équipe de communication de l'IRT SystemX pour leur soutien indéfectible notamment au concours « Ma Thèse en 180 s ». Mme Virginie BOISGONTIER, en particulier, a su discerner en moi, des capacités d'élocution au point de m'inciter à participer à ce concours auquel je suis parvenue à la finale de Paris-Saclay.

Mes sincères remerciements à ma famille, à mon père, Dr Pierre Marcel POKAM, à ma mère Mme Brigitte POKAM et à chacun de mes quatre frère et sœurs. Ils ont su essuyer mes larmes quand je pleurais, être doux quand j'étais en colère, supporter mes temps de silence parce que trop préoccupée par la rédaction de ce manuscrit. Il y a également quelques amis très proches que je ne saurais oublier de mentionner. Merci à mes chères amies Dorice, Carole, Ide et Julie qui ont été juste formidables. Merci à Patrice, Christian, Hermann pour votre sollicitude et vos sourires qui m'ont poussé à en avoir un quand tout me poussait à être triste.

Glossaire

ABS: *Anti-lock Braking System*

ACC : *Adaptive Cruise Control*

ACM : Analyse à Correspondances Multiples

ADAS: *Advanced Driver Assistance System*

ConTA: *Control Task Analysis*

COSMODRIVE: *COgnitive Simulation MOdel of the DRIVEr*

CWA: *Cognitive Work Analysis*

CWS: *Common Work Space*

DrSIHMI: *Driving Simulator for Human-Machine Interaction*

ESP : *Electronic Stability Program*

ETC : Espace de Travail Commun

EV : Ego-véhicule

HA : Hiérarchie d'Abstraction

HUD: *Head Up Display*

IHM : Interface Homme-Machine

LRA : Localisation et Réalité Augmentée

NdA : Niveau d'Automatisation

NDRT: *Non-Driving Related Tasks*

NHTSA: *National Highway Traffic System Administration*

RA : Réalité Augmentée

RDT : Répartition Dynamique des Tâches

SA: *Situation Awareness*

SAE: *Society of Automotive Engineers*

SAT: *Situation Awareness-based agent Transparency*

TINC : Traitement de l'Information et des Niveaux de Contrôle

VA : Véhicule Autonome

WDA : *Work Domain Analysis*

Table des matières

Glossaire **6**

Introduction générale **16**

Partie I CONCEPTS FONDAMENTAUX POUR LA CONCEPTION DE L'INTERFACE D'UN VÉHICULE FORTEMENT AUTOMATISE **23**

Chapitre I. De l'interaction Humain-Machine au sein d'un système automatisé, à la coopération 24

I. Introduction **25**
II. Allocation de tâches et allocation de fonctions **28**
III. Allocation statique **30**
III.1 Taxonomie de Sheridan et Verplanck 31
III.2 Taxonomie de Parasuraman, Sheridan et Wickens 31
III.3 Taxonomie de la Society of Automotive Engineers (SAE) 33
IV. Allocation dynamique **35**
IV.1 Délégation des fonctions 35
IV.2 Répartition dynamique des tâches (RDT) 36
V. La Coopération Homme-Machine **39**
V.1 Définition 39
V.2 Espace de travail commun ou *Common Work Space* 41
V.3 Taxonomies de la coopération 42
VI. Difficultés liées aux interactions Homme-Machine **45**
VII. Conclusion **46**

Chapitre II. Situation Awareness et conduite automobile **47**

I. Introduction **48**
II. Les modèles de la *Situation Awareness* **49**
II.1 Modèle d'Endsley 51
II.2 Représentations occurrentes et COSMODRIVE 53
III. Facteurs qui influencent la *Situation Awareness* en conduite automobile : intérêt de la Réalité Augmentée **56**
III.1 Incidence de l'IHM sur la perception (niveau 1 de la SA) 57
III.2 Incidence de l'IHM sur les niveaux 2 et 3 de la SA 58
IV. La représentation mentale dans les voitures hautement automatisées **60**
IV.1 Phase de reprise en main 60
IV.2 Problème de confusion des modes 62
IV.3 Conception des interfaces dans les voitures autonomes 62
V. Conclusion **69**

Chapitre III. Conception d'une IHM basée sur la transparence **70**

I. Introduction **71**
II. La confiance **72**
II.1 Rôle de la confiance dans la conduite automobile automatisée 72
II.2 Facteurs qui influencent la calibration de la confiance 73
III. La transparence **76**
III.1 Transparence dans la conduite automobile 76
III.2 Modèle Situation Awareness-based Agent Transparency 77
III.3 Modèle de Lyons 77
III.4 Choix d'un modèle de transparence 79
IV. Cognitive Work Analysis **82**

IV.1 Étapes de la Cognitive Work Analysis 83
IV.2 Analyse du domaine de travail 85
IV.3 Analyse de la tâche de contrôle (ConTA) 88
V. Conclusion 92

Conclusion de la partie I 93

Partie II PRISE EN COMPTE DE LA TRANSPARENCE DANS LA CONCEPTION D'UNE INTERFACE 97

Introduction de la partie II 98

Chapitre IV. Définition des principes de transparence et application de la *Cognitive Work Analysis* 102
I. Introduction 103
II. Les principes de transparence 104
II.1 Les principes de transparence issus du modèle de l'objectif général 105
II.2 Les principes de transparence issus du modèle de la tâche 106
II.3 Les principes de transparence issus du modèle analytique 109
II.4 Les principes de transparence issus du modèle de l'environnement 110
II.5 Les principes de transparence issus du modèle de la coopération 111
II.6 Les principes de transparence issus du modèle de l'agent humain 113
II.7 Synthèse 113
III. La Cognitive Work Analysis de la voiture autonome 116
III.1 L'analyse du domaine de travail avec la Hiérarchie d'Abstraction 116
III.2 L'analyse de la tâche de contrôle avec la double échelle de Rasmussen 120
III.3 Ensemble des besoins informationnels 126
IV. Mise en relation de la Cognitive Work Analysis et des principes de transparence 128
IV.1 Besoins informationnels et principes de transparence 128
IV.2 Possibilité de communication des informations 133
V. Conclusion 136

Chapitre V. Architecture technique et représentation graphique 137
I. Introduction 138
II. Architecture fonctionnelle de l'automate 139
II.1 Le module de perception 141
II.2 Le module d'évaluation de la situation 141
II.3 Le module décisionnel 142
II.4 Le superviseur de conduite 143
II.5 Le superviseur IHM 143
II.6 Les modules pilotant les différents afficheurs 144
III. Organisation et représentation graphique des informations 146
III.1 Organisation des informations 146
III.2 Représentation graphique des informations 147
IV. Conclusion 155

Conclusion de la partie II 156

Partie III 159

VALIDATION EXPÉRIMENTALE 159

Introduction de la partie III 160

Chapitre VI. Validation expérimentale : hypothèses et protocole 162

I. Introduction **163**
II. Interfaces et hypothèses **164**
II.1 Hypothèses relatives à l'ensemble du scénario de conduite 168
II.2 Hypothèses relatives à des scènes de conduite spécifiques 168
III. Le protocole expérimental **170**
III.1 Participants 170
III.2 Matériel 172
III.3 Scénarios de conduite 173
III.4 Mesures 175
IV. Analyse des données **184**
IV.1 Analyse des données non-verbales 184
IV.2 Analyse des données verbales 188
V. Conclusion **189**

Chapitre VII. Validation expérimentale : résultats et discussion **190**
I. Introduction **191**
II. Analyse des variables liées aux activités cognitives **194**
II.1 Les données oculométriques 194
II.2 Contenu des IHM 202
II.3 Situation Awareness 212
III. Analyse des variables liées à l'expérience utilisateur **218**
III.1 Sentiment d'inconfort et sentiment de confiance 218
III.2 Satisfaction relative des participants 225
IV. Discussion générale et Conclusion **229**

Conclusion de la partie III **230**

Conclusion générale **234**

Bibliographie **241**

Annexes **267**
Annexe 1 : Hiérarchie d'Abstraction de la voiture autonome **268**
Annexe 2 : Questionnaire Q0 sur les habitudes de conduite **271**
Annexe 3 : Questionnaire Q1 sur la Situation Awareness **274**
Annexe 4 : Questionnaire Q2 pour l'évaluation de chaque IHM **275**
Annexe 5 : ACM dans un système à composante humaine (SCH). Exemple didactique avec le questionnaire relatif aux habitudes de conduite. **277**
Principes généraux 277
ACM des variables d'identification d'un participant 277

Table des figures

Figure 1: La réalisation de la tâche de conduite par les deux agents humain et technique (traduit de Christensen et al. 2015) 18
Figure 2: Problématique de la conception d'interface dans le cadre de la conduite autonome 20
Figure 3: Périodes-clés dans l'automatisation des véhicules (Khan, 2012) 25
Figure 4: Démarche et définition du degré d'automatisation d'un système Humain-Machine, d'après Rieger et Greenstein (1982) 29
Figure 5: Exemples de systèmes avec des niveaux d'automatisation différents pour chacune des quatre fonctions (Parasuraman & Sheridan, 2000) 32
Figure 6: Recouvrement des compétences (d'après Chignell & Hancock, 1985) 36
Figure 7: Répartition interne, explicite, implicite et mixte (Crévits, 1996) 37
Figure 8 : Répartition externe, explicite, implicite et mixte (Crévits, 1996) 37
Figure 9 : Les activités coopératives d'après Hoc (2001a) 40
Figure 10: Définition d'un espace de travail commun (Debernard, 2009) 41
Figure 11 : Coopération entre agents grâce à un espace de travail commun(CWS). ATCO= Air Traffic Controller » (Contrôleur Aérien) ; STAR= Système Tactique d'aide à la Résolution 42
Figure 12 : La Coopération Homme-Machine dans le domaine de la conduite automobile 44
Figure 13 : Modèle de la Situation Awareness d'Endsley (traduit et adapté de Endsley, 1995) 51
Figure 14: Les facteurs qui influencent la SA en conduite automobile manuelle 57
Figure 15: Rectangles englobants de tous les piétons détectés (Kim et al., 2016) 58
Figure 16: Ombre virtuelle du piéton identifié comme étant sur le chemin du véhicule-sujet (Kim et al., 2016) 58
Figure 17 : Concept "Suite de boomerangs" en variation « non coupé » (Pfannmüller et al., 2015) 59
Figure 18: Concept "flèche" en variation « non coupé » (Pfannmüller et al., 2015) 59
Figure 19 : L'agent humain et les boucles de contrôle (Banks et al, 2014) 61
Figure 20 : Modèle Skills-Rules-Knowledge (traduit de Rasmussen (1983)) 64
Figure 21 : Illustration de la Réalité diminuée. Figure gauche : stylo occultant partiellement la carte. Figure droite : Scène sans stylo (Zokai, Esteve, Genc,, & Navab, 2003) 66
Figure 22 : Les emplacements possibles pour le HUD (adapté de Guo et al., 2014) 68
Figure 23: Le modèle de Lyons enrichi des fonctions cognitives 80
Figure 24: Contraintes associées à un système (schéma traduit de Naikar (2013) 83
Figure 25 : Relation entre domaine de travail, activités, organisation sociale et coopération, stratégies et compétences (schéma traduit de Naikar (2013)) 84
Figure 26 : Double échelle de Rasmussen (adapté à partir de Rasmussen,1986) 90
Figure 27 : Démarche de recherche utilisée 101
Figure 28 : Mode manuel M (à gauche) et mode autonome A (à droite) indiqués dans une interface Bosch 111
Figure 29 : Tronçons où le mode autonome est disponible sur une interface Bosch 112
Figure 30 : Les principes de transparences associés au modèle de Lyons 114
Figure 31: Extrait d'analyse du domaine de travail de la voiture autonome. Les segments en bleu représentent les relations pouvant exister entre les différents niveaux. Ici, pour des raisons de lisibilité, nous ne les avons pas tous représentés 119
Figure 32 : Échelle double de Rasmussen appliqué au changement de voie 123
Figure 33 : La double échelle de Rasmussen divisée en quatre régions correspondant aux fonctions de Parasuraman et al. (2000) 124
Figure 34 : Architecture fonctionnelle du simulateur 140
Figure 35 : Portée des capteurs de la voiture autonome dans le projet LRA 141
Figure 36 : Description qualitative des positions des véhicules par rapport à l'égo véhicule 141

Figure 37 : Les deux sous-modules du module décisionnel *142*
Figure 38 : Structure d'une règle *144*
Figure 39 : Exemple de traduction d'une règle *144*
Figure 40 : Interface Thinkware (Source: http://e27.co/korean-in-car-navigation-startup-launches-augmented-reality-driving-system-20141230/) *146*
Figure 41 : Interface Pioneer (Source : http://phys.org/news/2011-05-augmented-reality-cars.html) *146*
Figure 42 : Répartition des informations sur les écrans par niveau de contrôle *147*
Figure 43 : Scènes de changement d'une voiture autonome *149*
Figure 44 : Annotations pour le changement de voie. a) 'intention. b) Évaluation positive. c) action. *151*
Figure 45 : Annotations pour le différentiel de distance. a) Véhicule « éloigné » *151*
Figure 46 : Annotations pour le différentiel de vitesse. a) Différentiel de vitesse négatif. b) Différentiel de vitesse nul. c) Différentiel de vitesse positif *151*
Figure 47 : Quelques questions du questionnaire Q0 ..... *172*
Figure 48: DrSIHMI *173*
Figure 49 : Terrain utilisé lors de la simulation. Le trajet en orange est celui effectivement emprunté par la voiture autonome dans la simulation. *174*
Figure 50: Lunettes SMI utilisées dans le cadre de l'expérimentation *177*
Figure 51 : Heat Map réalisée par BeGaze *177*
Figure 52 : Moments de recueillement des différentes mesures, (DNi : roulage N° i). *186*
Figure 53 : Actigramme de la validation expérimentale. *186*
Figure 54: Scène de dépassement avec les deux poids-lourds *191*
Figure 55 : Scène de changement de voie à cause de la séparation d'autoroute *192*
Figure 56 : Scène de dépassement avec déboîtement soudain d'un véhicule issu d'un train de véhicules *192*
Figure 57 : Scène de virage *192*
Figure 58 : Représentation des zones d'intérêt *194*
Figure 59 : Définition des fonctions d'appartenance des trois modalités relatives au nombre de fixations dans une fenêtre spatiale donnée. *195*
Figure 60 : Plan principal de l'ACM du tableauY0, contenant les valeurs d'appartenance aux 3 modalités de nombre de fixations. a) Projection des points colonnes correspondant aux zones d'intérêt, aux scènes, au genre et aux interfaces. b) Projection des points lignes correspondant aux participants *198*
Figure 61 : Plan principal de l'ACM du tableau contenant les valeurs d'appartenance aux 3 modalités de nombre de fixations. a) projection en supplémentaire des points correspondants aux 5 modalités de l'interface et aux 2 fenêtres temporelles. b) idem pour le facteur sexe (point F et M) et le facteur roulage (DN2 et DN3). *199*
Figure 62 . Répartition du nombre de fixations dans les 90 situations dans la scène avec la séparation d'autoroute *200*
Figure 63. Répartition du nombre de fixations dans les 90 situations dans la scène de dépassement de 2 poids lourds. *200*
Figure 64 : Graphe d'analyse du virage avec In, Iw, Ii, Is et It *204*
Figure 65 : Proportion de personnes par IHM ayant donné des commentaires positifs, négatifs ou neutres sur l'indication de virage qu'ils ont vue *205*
Figure 66 : Partie 1 du dépassement des deux poids lourds PL 1 et PL 2 par la voiture autonome (VA) *206*
Figure 67 : Partie 2 du dépassement des deux poids lourds PL 1 et PL 2 par la voiture autonome (VA) *206*

Figure 68 : Graphe d'analyse de la partie 1 de la scène 1 de dépassement avec les deux poids-lourds. 208
Figure 69 : Les informations utiles dans chaque IHM mentionnées en première position par les participants. 210
Figure 70: Les informations utiles dans chaque IHM mentionnées en deuxième position par les participants. 211
Figure 71 : Les informations absentes dans chaque IHM mais jugées importantes par les participants. 211
Figure 72 : L'ACM des variables du questionnaire Q1 obtenu à partir du tableau Y1. a) Projection des points-colonnes correspondant aux 12 modalités liées aux questions G1 à G6 et les facteurs principaux. b) Projection des 45 points-lignes correspondant au premier roulage des 45 participants. 214
Figure 73. Tests d'hypothèses pour évaluer l'impact des facteurs I, S, SF, G et SU sur le questionnaire G dans un contexte inférentiel. (I : Interface, S : scenario, SF : scènes de gel, G : genre, SU : utilisation d'un simulateur avant l'expérience) 215
Figure 74 : Valeurs d'appartenance pour les modalités floues 219
Figure 75 : ACM des variables BP et du questionnaire C obtenu à partir du tableau Y2. a) Projection des 35 points-colonnes correspondant aux 35 modalités b) Projection des 135 points-lignes correspondant aux 3 roulages des 45 participants. c) Projection des lignes supplémentaires des profils de moyenne correspondant aux 3 roulages, les 3 scénarios de conduite, les 5 interfaces (et les 2 scénarios dans lesquels il y a eu gel de la situation, d) des lignes supplémentaires des profils de moyenne 220
Figure 76 : Quelques graphiques pour montrer de façon plus directe la sortie de l'ACM (voir Figure 6). La première ligne montre la présence (a) ou l'absence (b et c) de plusieurs relations. La dernière ligne montre le faible effet des facteurs. 221
Figure 77 : Les tests d'hypothèses pour évaluer les effets des facteurs DN et S sur les sorties de l'ACM (voir Figure 75) dans un contexte d'inférence. 222
Figure 78 : Tests d'hypothèses pour évaluer l'effet du facteur I sur les sorties de l'ACM (voir Figure 75) dans un contexte inférentiel. 223
Figure 79 : Classement des modalités de I par chaque participant. 226
Figure 80 : Classement des modalités en première position 226
Figure 81 : Approche méthodologique utilisée dans nos travaux. 238
Figure 82 : Prototype Symbioz 238
Figure 83: Extrait d'analyse du domaine de travail de la voiture autonome. Les lignes bleues mettent en évidence entre les différents niveaux. 270
Figure 84 : Principe de fenêtrage flou avec nos variables quantitatives. 277
Figure 85 : Histogrammes et fenêtrage flou pour les 5 variables quantitatives 278
Figure 86 : ACM de sept variables d'identification (cas du premier plan principal). A) Projection des 19 points-colonnes correspondant aux 19 modalités (pour les 5 variables quantitatives, les 3 modalités sont reliées dans la direction faible-moyenne-élevé) b) Projection des 45 points-lignes correspondant aux 45 participants. c) Profils relatifs aux variables avec une grande contribution dans l'axe de contrôle 1 (PL, DM, CL et EL) pour deux participants opposés (SL et JB); les profils établis sur la base des moyennes arithmétiques sont également montrés. 279
Figure 87 : Deux graphiques qui montrent plus directement les principaux résultats de l'ACM (r correspond au coefficient de corrélation linéaire) 280
Figure 88 : Deux exemples de points lignes supplémentaires. 1) l'objectif est de situer un nouveau participant, nommé "imaginary", en relation avec les 45 premiers participants et 2) l'objectif est de montrer l'effet du facteur G (genre) qui conduit à deux profils moyens: un pour les hommes (point M) et un pour les femmes (point F) 281

Figure 89 : Forme "V" avec l'ACM quand deux variables sont plus ou moins linéairement correlées (r=0.6). Dans un tel exemple didactique, Chacun des 45 participants est caractérisé par 6 valeurs d'appartenance (certains d'entre eux sont indiqués..... 282

Table des tableaux

Tableau 1 : Les dix niveaux d'automatisation de Sheridan et Verplanck (1978) 31
Tableau 2 : Taxonomie de la SAE 33
Tableau 3 : Allocation dynamique implicite et explicite 36
Tableau 4 : Niveau de risque et annotations associées (Park et al., 2015) 58
Tableau 5 : Tableau de comparaison des trois modèles de transparence 80
Tableau 6: L'espace de décomposition et d'abstraction appliqué au système de transport routier australien (extrait de Salmon, et al. (2005)) 87
Tableau 7 : Modèle de l'activité contextuelle 91
Tableau 8:Matrice TINC 104
Tableau 9 : Matrice TINC pour le principe T1 107
Tableau 10 : Matrice TINC pour le principe T2 108
Tableau 11 : Matrice TINC pour le principe T3 108
Tableau 12: Matrice TINC pour le principe A1 109
Tableau 13 : Matrice TINC pour le principe A2 109
Tableau 14: Matrice TINC pour le principe E1 110
Tableau 15: Matrice TINC pour le principe E2 110
Tableau 16: Matrice TINC pour le principe C2 112
Tableau 17: Synthèse des principes de transparence selon les quatre fonctions de traitement de l'information de Parasuraman et al. (2000). 114
Tableau 18: Synthèse des principes de transparence en fonction des niveaux de contrôle de Michon (1985) 114
Tableau 19 : Informations potentielles issues de la WDA 120
Tableau 20 : Besoins informationnels issus de la ConTA 125
Tableau 21 : Ensemble des besoins informationnels pour l'agent humain 126
Tableau 22 : Définition des informations par principe de transparence et par fonction de Parasuraman et al. (2000) 130
Tableau 23 : Définition des informations par principe de transparence et par niveau de contrôle de Michon (1985) 131
Tableau 24 : Quelques capteurs de la voiture autonome 133
Tableau 25 : Présentation des besoins informationnels dans les véhicules contemporains 133
Tableau 26 : représentation des informations de niveau tactique et opérationnel selon les 4 fonctions « prise d'informations », « analyse de l'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action ». NB : EV= Ego-véhicule 152
Tableau 27 : Les spécifications des 5 IHM suivant les fonctions de Parasuraman et al. (2000). NB : « 1 » signifie que les informations en rapport avec la fonction sont présentes et «0» signifie qu'elles sont absentes. 164
Tableau 28 : Informations par fonction de chaque principe de transparence 166
Tableau 29: Composition des participants suivant les critères "Genre" et "Age" 170
Tableau 30 : Déroulement de l'expérimentation 171
Tableau 31 : Répartition des participants par IHM 172
Tableau 32: Répartition des scènes suivant la distinction "normales" et "dangereuses » 175
Tableau 33 : Nombre de participants par IHM/scénario 175
Tableau 34 : Comparaison de la SAGAT et de la SART 179
Tableau 35: Questionnaire SAGAT 180
Tableau 36 : Variables utilisées dans la démarche expérimentale 184
Tableau 37 : Codage des zones d'intérêt 194
Tableau 38 : Intérêt du codage flou avant le calcul des moyennes 195

Tableau 39 : Valeurs d'appartenance pour le participant CA dans le 3ème roulage, dans la scène de dépassement avec les deux poids-lourds *196*
Tableau 40 : Ensemble des indices évoqués par les participants *202*
Tableau 41 : Tableau de sigles pour les informations IHM *209*
Tableau 42 : Résumé des résultats relatifs aux activités cognitives *217*
Tableau 43: Résumé des résultats relatifs à l'Expérience Utilisateur *227*
Tableau 44 : Capteurs de la voiture autonome *268*
Tableau 45 : Comparaison de la fenêtre d'absence vs. Présence avant le résumé. Trois exemples quand l'intervalle de la variable est [0, 10] avec deux individus. a) Les trois moyennes arithmétiques sont identiques, b) Les triplets des Moyennes des valeurs d'Appartenance sont différents *277*

Introduction générale

Des opérations d'assemblage en industrie aux domaines du transport, l'automatisation change profondément le paradigme de réalisation des tâches. Désormais, des agents techniques sont de plus en plus impliqués dans leur réalisation, et leur rôle peut varier du simple accompagnement de l'opérateur humain dans la réalisation de tâches spécifiques, à la réalisation complète et autonome d'autres tâches. Depuis quelques années, la conduite automobile est aussi profondément modifiée par cette automatisation qui peut être partielle ou totale (SAE, 2013). Plusieurs prototypes de voitures automatisées ont déjà été testés aussi bien aux États-Unis, au Japon qu'en Europe (TRIMBLE, BISHOP, MORGAN & BLANCO, 2014 ; MEYER & BEIKER, 2014). Les promesses de la conduite autonome sont nombreuses : amélioration de la sécurité routière, réduction des congestions, amélioration du confort de l'agent humain et amélioration de la mobilité dans un contexte de changement démographique (MEYER & DEIX, 2014). Si le développement des voitures autonomes est accéléré par les avancées technologiques de ces dernières années, l'aspect juridique et l'aspect lié aux « facteurs humains » doivent être néanmoins pris en compte.

En France, l'aspect juridique des voitures autonomes soulève beaucoup de débats. Le code de la route ne comporte actuellement aucune disposition permettant l'utilisation de telles voitures, que la délégation de la tâche de conduite à un automate soit totale ou partielle. Le problème est encore plus important pour les voitures sans conducteur. En effet, l'article R.412-6-I du code de la route transposant en droit français les articles 8.1 et 13.1 de la convention de Vienne, stipule que « *tout véhicule en mouvement ou tout ensemble de véhicules en mouvement doit avoir un conducteur.* » Dans le cadre des 34 plans de la Nouvelle France Industrielle, l'article 9-IV du projet de loi relatif à la transition énergétique habilite « *le gouvernement à prendre par ordonnance toute mesure permettant la circulation des voitures autonomes sur la voie publique à des fins expérimentales* ». Au niveau juridique, deux autres questions se posent :

1. À qui revient la responsabilité en cas d'accidents routiers ? À l'agent humain ou au constructeur automobile ? Selon la loi française actuelle, la responsabilité en cas d'accident de la route incombe au conducteur de la voiture.

2. Concernant la protection des données, qui aura le droit d'accéder aux données de localisation nécessaires au fonctionnement des voitures autonomes ? Cette question n'est gérée par aucun texte national français ou international.

Si l'aspect juridique est intéressant et soulève des problématiques pertinentes, il ne constitue pas le point sur lequel cette thèse se focalise. L'aspect lié aux « facteurs humains » est celui qui sera traité dans nos travaux en tirant parti de l'apport de deux disciplines : l'automatique humaine et la psychologie. La conduite automatisée, comme nous l'avons mentionné dans les lignes précédentes, est prometteuse. Cependant, dans son article « Ironies of automation », BAINBRIDGE (1983) met en évidence ce qui peut être perçu comme une épée de Damoclès : une forte automatisation est perçue comme souhaitable parce qu'elle permettrait de pallier les défaillances humaines mais, dans le même temps, on demande aux humains d'être en mesure de reprendre la main pour faire face à des situations difficiles ou imprévues pour lesquelles les automatismes n'ont pas été conçus. « L'ironie » réside donc dans le fait que plus un système est automatisé, plus la contribution de l'opérateur humain devient cruciale !

D'autres problèmes, soulevés par des auteurs comme PARASURAMAN, SHERIDAN ET WICKENS (2000), surviennent à cause de la modification du paradigme de conduite. En mode manuel, l'agent humain est en charge de toute la tâche de conduite et l'assure via la perception qu'il a de son environnement de conduite et du contrôle qu'il effectue sur son véhicule. Avec l'automatisation, la tâche de conduite n'est plus uniquement assurée par l'agent humain : l'agent

technique ou l'automate va aider à la réalisation de la tâche de façon partielle ou totale en fonction de son niveau d'automatisation (Figure 1). Dans les voitures totalement autonomes ou autonomes sous des conditions spécifiques, l'agent humain pourra alors réaliser des tâches sans lien avec la conduite (*Non Driving Related Tasks* ou NDRT) comme la lecture d'un livre.

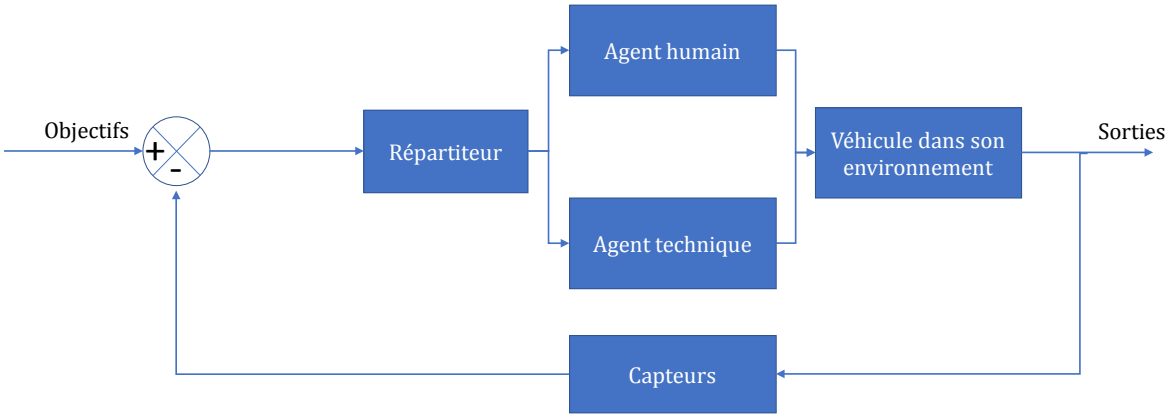


Figure 1: La réalisation de la tâche de conduite par les deux agents humain et technique (traduit de Christensen et al. 2015)

L'abandon de la tâche de conduite que permet l'automatisation peut être sans conséquence majeure dans certains cas, mais aussi conduire à des accidents mortels dans d'autres. Ce fut le cas par exemple le 7 Mai 2016, date à laquelle un accident impliquant une Tesla et un poids lourd a provoqué le décès du conducteur (MOTORS, 2015). À bord de sa Tesla modèle S, le système *Autopilot*, qui offre des fonctions semi-autonomes, était en effet activé. Cet accident est survenu à 119 km/h sur une autoroute de Floride. Comme le précise Bryan Thomas, porte-parole de la *National Highway Traffic System Administration* (NHTSA), « *l'enquête n'a pas trouvé de défaut au logiciel* ». L'agent humain, assis sur le siège conducteur, aurait été distrait pour des raisons non élucidées, alors que son rôle était de superviser la conduite, dans un tel système où la conduite n'est pas déléguée. L'aspect lié aux « facteurs humains » joue donc un rôle important dans la conception des voitures autonomes, non seulement pour assurer la sécurité de l'agent humain, mais aussi pour garantir l'acceptabilité de ces voitures par le public. Ceci permettrait d'éviter les dérives d'usage comme lors de l'accident cité ci-dessus. C'est la raison pour laquelle cet aspect est traité par la plupart des constructeurs automobiles dans le monde entier tels que Volvo, Mercedes et BMW. En France, le groupe Renault n'est pas en reste.

Renault propose déjà sur ses véhicules des systèmes d'aide à la conduite performants qui agissent pour la plupart sans intervention humaine, tels que le freinage d'urgence automatique. Ces systèmes d'aide à la conduite, encore connus sous le terme d'ADAS - *Advanced Driver Assistance System* - sont le socle technologique de la conduite autonome. Afin de devenir compétitif sur le marché de l'automobile, Renault s'est rapproché d'autres constructeurs dont Nissan avec lequel il forme une alliance. L'alliance Renault-Nissan envisage l'automatisation de trois façons principales (RENAULT) :

1. **Eyes on/Hands on**. Dans ce type d'automatisation, le conducteur devra toujours conserver les yeux sur la route et les mains sur le volant. La voiture dispose de systèmes d'aide à la conduite telles que le régulateur de vitesse. Elle peut également disposer d'un régulateur de vitesse adaptatif qui maintient le véhicule à une vitesse programmée et à une distance constante du véhicule qui le précède.

2. **Eyes off/Hand off**. Dans ce type d'automatisation, l'agent humain ne doit plus nécessairement regarder la route ni avoir les mains sur le volant. La supervision par

l'agent humain n'est donc plus requise à ce niveau. L'objectif de Renault est de devenir à l'horizon 2020, le premier constructeur généraliste à proposer ce type d'automatisation à prix abordable. Dans cette optique, Renault a déjà présenté un prototype, *NextTwo*, un mulet[1] qui intègre la technologie Eyes off/Hands off. Par ailleurs, des tests avec des modèles *Espace* sont actuellement en cours sur les routes françaises.

3. **Mind off**. Dans ce type d'automatisation, l'attention de l'agent humain n'est plus requise. En effet, lorsque la voiture autonome se rend compte qu'elle ne peut pas gérer une situation de conduite, elle se mettra en sécurité en s'arrêtant notamment sur une bande d'arrêt d'urgence. Le but ultime de ce type d'automatisation est le déplacement de la voiture autonome sans aucun agent humain à son bord. Si les perspectives offertes par une telle automatisation semblent multiples, elle n'est pas envisagée dans un futur proche.

Afin de concevoir des interfaces qui garantissent le niveau de sécurité voulu pour les systèmes eyes off/ Hand off, Renault déploie des projets internes au groupe et des projets externes qui incluent d'autres partenaires. Parmi ceux-ci figure, notamment, le projet Localisation et Réalité Augmentée (LRA) dont les principaux travaux s'effectuent à l'Institut de Recherche de technologie (IRT) SystemX. Le projet LRA est à la croisée de deux domaines : le ferroviaire et la conduite automobile. La thèse dans laquelle nous nous proposons de concevoir l'interface d'une voiture autonome, est directement rattachée à la partie « Réalité Augmentée » du projet. Cette partie met en collaboration des partenaires académiques tels que le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), le LAMIH (UMR CNRS 8201) de l'Université de Valenciennes et le Lab-STICC (UMR CNRS 6285) de l'Université de Bretagne Sud, mais aussi des partenaires industriels comme Valeo, Assystem et Oktal, ainsi que Renault. Dans cette partie du projet, l'enjeu est d'étudier les nouvelles interactions fondées sur la technologie Réalité Augmentée pour des véhicules qui seront autonomes sous certaines conditions (de trafic, d'infrastructure, etc.) et dans lesquels l'agent humain devra être en mesure de reprendre la main en toute sécurité. Il s'agit, dans le projet LRA, de concevoir des interfaces qui faciliteront la compréhension du fonctionnement du système et favoriseront la reconstruction de la *Situation Awareness* de l'opérateur humain lors de la reprise en manuel. La Figure 2 présente la problématique générale de la thèse. La voiture autonome et l'agent humain constituent un système humain–machine dans lequel il y a coopération entre les deux agents. Dans ce système, l'agent humain doit notamment comprendre le fonctionnement de l'automate lorsqu'il est en mode autonome, pour accepter de l'utiliser en toute confiance. Par ailleurs, il doit avoir aussi une perception correcte de son environnement de conduite pour pouvoir reprendre en manuel la conduite de la voiture autonome de façon convenable. La question est donc de savoir quelles sont les informations à communiquer à l'agent humain et comment il faut les lui communiquer. Comme la Figure 2 le précise, il faut tenir compte des spécificités de la Réalité Augmentée et des contraintes cognitives de l'agent humain.

[1] Un mulet est prototype de véhicule roulant.

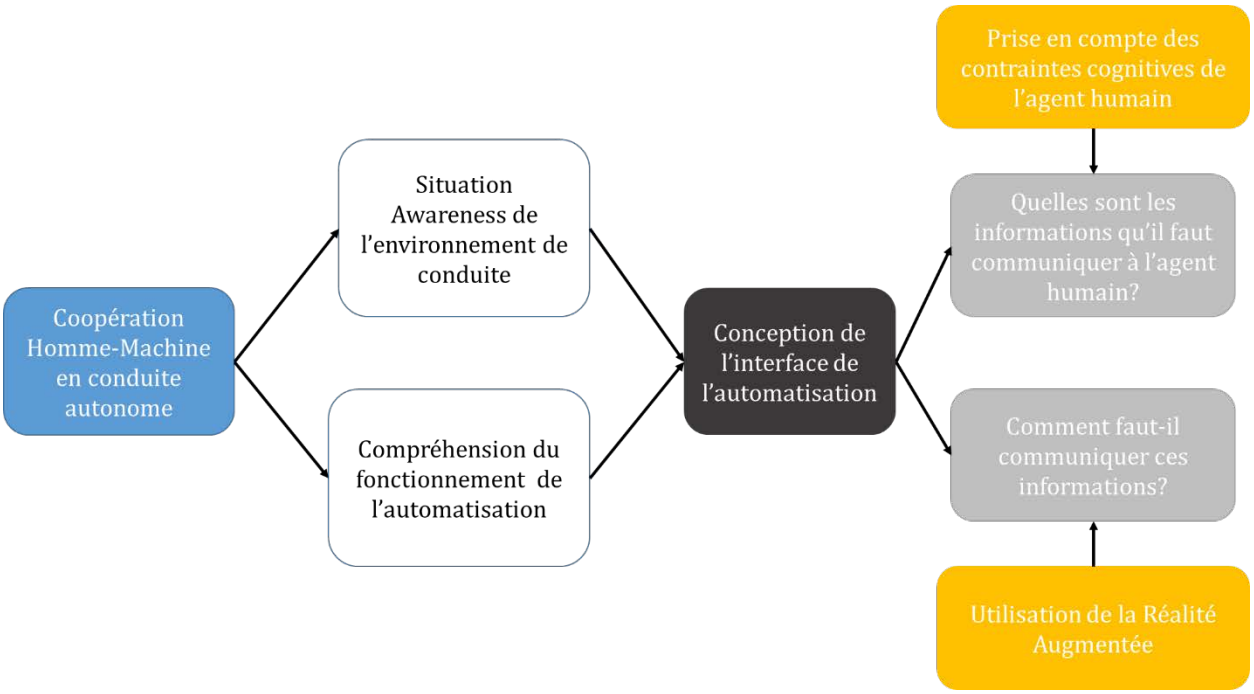


Figure 2: Problématique de la conception d'interface dans le cadre de la conduite autonome

Comme nous l'avons mentionné dans les lignes précédentes, la première thématique que nous aborderons dans cette thèse est celle de la Coopération Homme-Machine (CHM). En effet, dans la conduite autonome, il est important que l'agent humain et l'automatisation aient une représentation partagée des buts et plans relatifs à la réalisation de la tâche de conduite (HOC, 2001). L'intérêt de la Coopération Homme-Machine a déjà été démontré par les travaux de RIERA ET DEBERNARD (2003), et ceux de DEBERNARD ET AL. (2009) dans le cadre du trafic aérien. La coopération entre les deux agents est particulièrement importante dans les phases de transition entre mode manuel et mode automatique.

Dans le domaine des véhicules fortement automatisés, la question de la reprise en main est un sujet qui a été étudié par plusieurs auteurs notamment dans l'optique d'assurer la réalisation de cette phase en des temps réduits et en toute sécurité (RADLMAYR, GOLD, LORENZ, FARID & BENGLER, 2014 ; ZEEB, BUCHNER & SCHRAUF, 2015 ; SCHWALK, KALOGERAKIS & MAIER, 2015). Il a été démontré que la reprise en main est impactée par l'état de l'agent humain avant ladite phase. Si l'agent humain est « hors de la boucle de conduite », la reprise en main est de mauvaise qualité (LOUW, MERAT, & JAMSON, 2015 ; GOLD, DAMBÖCK, LORENZ & BENGLER, 2013). Cet état est symptomatique d'une perte de la *Situation Awareness* ou d'une représentation mentale insuffisante ou incorrecte de la situation. Ainsi, le premier défi de conception que nous devons relever consiste à faciliter la reconstruction de la *Situation Awareness* de l'agent humain à un niveau suffisant avant la reprise en main. Pour mettre en évidence les éléments de l'environnement les plus importants et pour soutenir la *Situation Awareness* du conducteur, la technologie « Réalité Augmentée » a été retenue dans le projet LRA. En effet, elle offre la possibilité de rendre saillants des objets de l'environnement par l'ajout d'annotations visuelles directement dans le champ de vision de l'opérateur (AZUMA, 1997). Si la plus-value de la réalité augmentée a déjà été mise en évidence en conduite autonome notamment pour faciliter la perception que l'agent humain a de son environnement de conduite et l'aider à la prise de décision (LORENZ, KERSCHBAUM & SCHUMANN, 2014), des problèmes tels que masquage des autres objets et la différence de luminosité entre les annotations et les objets réels ont également été mentionnés. Pour tirer parti de tous les avantages de la Réalité Augmentée en limitant ses inconvénients, nous avons retenu l'afficheur tête haute ou *Head Up Display* (HUD) (NEWMAN,

2017). L'utilisation de la Réalité Augmentée vient donc répondre à la question « Comment représenter les informations présentées par l'interface ? »

Le deuxième défi à relever consiste à garantir la compréhension de l'automate par l'agent humain. Il s'agit en effet d'un facteur essentiel pour la construction et la calibration de la confiance comme le montrent par exemple les travaux de LEE ET SEE (2004), et ceux de HOFF ET BASHIR (2015). Un des écueils à éviter est la sous-confiance qui pousserait l'agent humain à rejeter l'utilisation de la voiture autonome à court terme et à un échec commercial à une plus grande échelle. Tout l'enjeu à ce niveau est donc de favoriser une compréhension correcte du fonctionnement de la voiture autonome par l'agent humain, ce qui lui permettra d'avoir un niveau de confiance « correct » envers l'automatisation. C'est la raison pour laquelle nous utiliserons la notion de transparence pour concevoir l'interface et pour répondre à la question « quelles sont les informations à communiquer au conducteur pour qu'il puisse comprendre ce que fait la machine ? ». Si la transparence a été mise en relation avec la confiance dans plusieurs études (MUIR, 1994 ; MUIR & MORAY, 1996), il y a relativement peu de travaux qui se sont penchés sur cette problématique de façon précise dans le cadre de la conduite autonome. Nous nous proposons donc de définir des principes de transparence adaptés à ce domaine. Nous choisirons, comme cadre théorique, le modèle proposé par LYONS (2013). Nous faisons l'hypothèse qu'une interface « transparente », facilitera la compréhension, par l'agent humain, de la façon dont l'automate gère des situations critiques. Si ces situations ne sont pas maîtrisées ou comprises, l'agent humain pourra alors reprendre le contrôle de la voiture.

Afin d'étayer les principes de transparence pour la conduite autonome, nous proposons d'utiliser la méthodologie *Cognitive Work Analysis.* La mise en œuvre de cette méthodologie nous aidera à la définition du besoin informationnel du conducteur. Cette démarche, proposée par RASMUSSEN (1986), RASMUSSEN, PEJTERSEN ET GOODSTEIN (1994), facilite la prise en compte du facteur humain dès les premières phases de conception d'un système sociotechnique. En effet, nous basant sur la façon dont un agent humain réalise la tâche de conduite en mode manuel et en particulier la manœuvre de changement de voie, nous nous proposons d'en déduire un comportement de l'automatisation qui soit au plus près de ce qu'un agent humain ferait, afin d'augmenter la prédictibilité de l'automatisation. Par ailleurs, cette méthodologie sera utilisée pour fournir des informations contextualisées qui répondront aux attentes de l'agent humain.

Dans le cadre du projet LRA la démarche mise en œuvre se décline en 6 étapes :

- **Étape 1** : Définition des principes de transparence pour la conception d'interface de la conduite autonome.

- **Étape 2** : Application des deux premières étapes de la CWA pour définir le besoin informationnel mis en évidence par les principes : l'analyse du domaine de travail (*Work Domain Analysis)* et l'analyse de la tâche de contrôle (*Control Task Analysis)*.

- **Étape 3** : Ajustement du fonctionnement de l'automate pour répondre aux besoins informationnels dérivés de la CWA. L'automate, tel qu'il avait été pensé au début du projet LRA, ne permettait pas de communiquer toutes les informations révélées par la CWA. Il a donc fallu modifier l'automate pour permettre l'affichage de ces informations.

- **Étape 4** : Spécification des IHM sur la base des fonctions de traitement de l'information définies par PARASURAMANET AL. (2000).

- **Étape 5** : Validation expérimentale des principes de transparence sur un simulateur statique de l'IRT SystemX.

- **Étape 6** : Analyse et discussion des résultats visant à valider les principes de transparence.

Ce manuscrit de thèse est constitué de trois parties principales, d'une conclusion générale et d'une partie regroupant les annexes.

La première partie, intitulée « **Concepts fondamentaux pour la conception de l'interface d'un véhicule fortement automatisé** » comprend trois chapitres. Nous examinerons dans le chapitre I, la thématique de l'allocation des fonctions entre humain et machine en situation dynamique (DE WINTER & DODOU, 2014). Dans ce chapitre, nous distinguerons l'allocation statique de l'allocation dynamique. Nous présenterons en particulier quelques taxonomies d'automatisation. La dernière partie de ce chapitre sera consacrée à une approche alternative à l'allocation des fonctions, qui a été développée en France au LAMIH et qui vise à promouvoir la « Coopération Homme-Machine ». Le chapitre II, quant à lui, présentera le concept de *Situation Awareness* (SA). Après avoir exposé quelques modèles de la SA, nous montrerons que ce concept est central dans la supervision de processus dynamiques. Le dernier axe de ce chapitre présentera les facteurs qui ont une influence sur la SA d'un conducteur. Nous y présenterons en particulier l'impact de la Réalité Augmentée. Dans le chapitre III, nous aborderons la thématique de la transparence dans la conception des systèmes sociotechniques. Après avoir présenté le caractère central de la confiance dans les systèmes automatisés, nous définirons le concept de transparence. La dernière section de ce chapitre sera consacrée à la présentation de la *Cognitive Work Analysis* de manière générale, puis à une description des deux premières étapes de la CWA que nous avons utilisées.

La deuxième partie du mémoire intitulée, « **Prise en compte de la transparence dans la conception d'une interface** » présente nos contributions. Dans cette partie, deux chapitres décrivent nos choix et nos propositions d'IHM. Dans le chapitre IV, nous présenterons les principes de transparence que nous avons définis sur la base du modèle de LYONS (2013). La seconde section de ce chapitre est dédiée à l'application de la *Cognitive Work Analysis*. Dans le chapitre V, nous présenterons l'architecture fonctionnelle de l'automate utilisé pour la validation expérimentale en insistant sur les modifications qui y ont été apportées. Les interfaces conçues sont également spécifiées. Nous y évoquons, en particulier, les règles d'affichage que nous avons définies pour représenter chaque information, ainsi que leur forme qui a été choisie à partir de plusieurs séances de créativité. Une attention particulière sera également accordée à la structuration de ces informations sur les différents afficheurs.

La dernière partie, « **Validation expérimentale** » est constituée de deux chapitres. Le chapitre VI, expose le protocole expérimental conçu pour valider les principes de transparence. Le chapitre VII est consacré à la présentation et à la discussion des résultats de l'expérimentation.

La conclusion générale de ce mémoire synthétisera les principaux résultats qui permettent de valider certains principes de transparence. Elle mettra également en valeur les principales contributions théoriques et méthodologiques de ce travail de recherche. Elle proposera enfin quelques perspectives de travail pouvant être envisagées à court, moyen ou long terme

.

Partie I
CONCEPTS FONDAMENTAUX POUR LA CONCEPTION DE L'INTERFACE D'UN VÉHICULE FORTEMENT AUTOMATISE

Chapitre I. **De l'interaction Humain-Machine au sein d'un système automatisé, à la coopération**

I. Introduction

PARASURAMAN ET RILEY (1997) proposent de définir l'automatisation comme « *l'exécution partielle ou totale, par une machine (généralement un ordinateur) d'une fonction qui était initialement réalisée par un homme* ». Ainsi l'automatisation peut varier selon une échelle dont les niveaux les plus élevés représentent les degrés d'autonomie les plus élevés de la machine (PARASURAMAN ET AL., 2000). Actuellement, la conduite automobile est un domaine où l'automatisation progresse rapidement. Trois périodes-clés (ou paliers) peuvent être identifiées dans l'automatisation des véhicules et de la conduite (KHAN, BACCHUS, & ERWIN, 2012) : la période avant 2010, la période entre 2010 et 2025, et la période après 2025 (Figure 3).

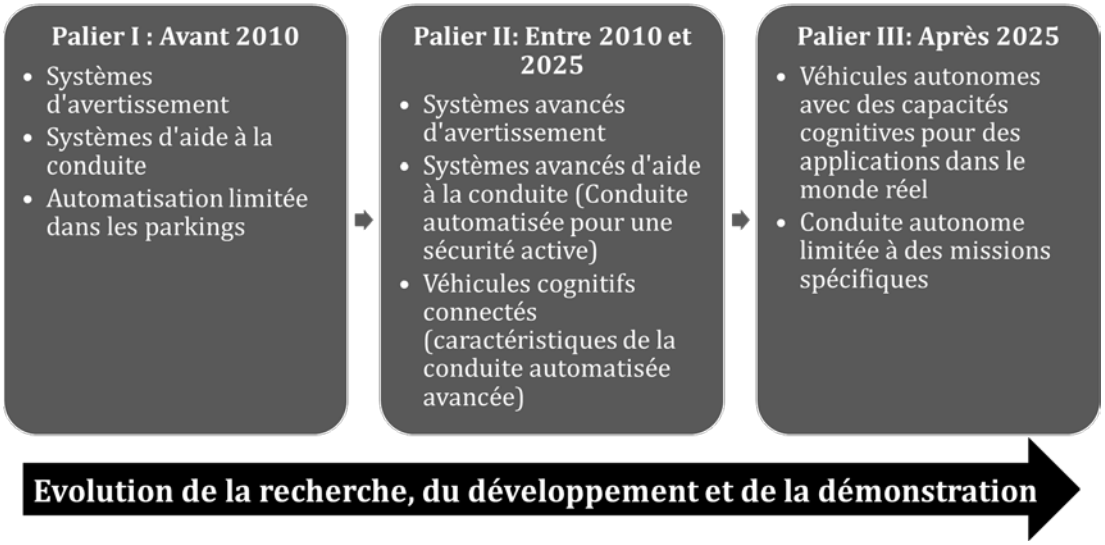


Figure 3: Périodes-clés dans l'automatisation des véhicules (Khan, 2012)

Avant 2010, les premiers systèmes automatiques mis en œuvre sur les véhicules concernaient les systèmes de sécurité active qui peuvent éviter la survenue des accidents. Parmi ces systèmes, on peut citer par exemple l'*Anti-lock Braking System* (ABS) ou l'*Electronic Stability Program* (ESP). Ensuite, des systèmes de type *Global Positioning System* (GPS) ont été utilisés pour assister le conducteur dans son activité de conduite. Afin de résoudre les problèmes de sécurité et de confort, des systèmes tels que le régulateur de vitesse puis *l'Adaptive Cruise Control*[2] (ACC) apparaissent après : c'est le début de l'automatisation de l'activité de conduite. Les systèmes du palier I ayant conduit à des résultats satisfaisants, les services de Recherche et Développement des constructeurs automobiles ont intensifié leurs efforts à travers différents projets tels que HAVEit (http://www.haveit-eu.org) et CityMobil (http://www.citymobil-project.eu) en Europe.

Nous sommes depuis 2010 au palier II, qui devrait s'achever en 2025. Cette période est marquée par la maturité de l'ACC et l'introduction de nouveaux systèmes. Il s'agit, entre autres,

[2] C'est un système d´assistance doté d'un radar à ondes millimétriques qui mesure la distance et la vitesse relative entre le véhicule et celui qui précède : si l'écart devient trop faible, le système réduit la vitesse en décélérant ou en sollicitant automatiquement les freins, jusqu´à 25 % de la puissance de freinage maximale. Si la décélération ne suffit pas, un signal d´alerte retentit. Ce système peut également fonctionner à l'aide d'une caméra.

du *Forward Collision Warning* (FCW), du *Lane Departure Warning* (LDW) et du *Lane Collision Warning* (LCW).

Après 2025, les technologies seront de plus en plus performantes et favoriseront l'apparition des véhicules autonomes qui laisseront au conducteur la possibilité de choisir entre une conduite manuelle et une conduite entièrement autonome (BEIKER & CALO, 2010 ; MITCHELL, BORRONI-BIRD & BURNS, 2010 ; RUPP & KING, 2010). Cette dernière sera – ou pourra – être dépendante de conditions particulières, ce qui induira des reprises en main du véhicule par le conducteur. Ces phases critiques nécessitent des études et recherches pour définir les conditions optimales et nécessaires qui favoriseront une reprise en main appropriée (BEIKER & CALO, 2010). Plusieurs auteurs (NORRIS, ALLARD, FILIPPOV, HAUN TURNER, GILBERTSON & NORBY, 2011 ; MERAT, JAMSON, LAI, DALY & CARSTEN, 2014) ont déjà réalisé des travaux dans ce sens. Certains auteurs ont également évoqué des voitures qui seront totalement autonomes et qui pourront ainsi fonctionner sans aucun conducteur humain à bord (RAPACZYNSKI, 2016).

Avant d'aller plus loin, il est important de relever la différence entre l'automatisation de la conduite et l'automatisation du véhicule. La distinction entre ces deux types d'automatisation a été faite par YOUNG, STANTON ET HARRIS (2007). En effet, ces auteurs mettent en évidence que les systèmes relevant de l'automatisation du véhicule font référence à l'ensemble des systèmes de bas niveau (i.e. du niveau opérationnel de la conduite). Par exemple, le régulateur de vitesse conventionnel gère l'accélération pour maintenir la vitesse. Les systèmes relevant de l'automatisation de la conduite concernent, quant à eux, les niveaux tactique et stratégique de la conduite. Dans cette catégorie de systèmes, on peut mentionner le régulateur de vitesse adaptatif (ACC) qui ôte un aspect cognitif de la tâche de conduite à l'agent humain. En effet, l'ACC perçoit la vitesse du véhicule qui est devant l'ego-véhicule. Ensuite, il décide d'adapter ou pas la vitesse selon ce qu'il a perçu. Finalement, il réalise l'action.

Dans ce mémoire, nous nous focaliserons sur l'automatisation de la conduite. Si celle-ci va certainement permettre d'améliorer la sécurité sur les routes – c'est un des objectifs recherchés par les constructeurs (AEBERHARD, KÜHBECK, SEIDL, FRIEDL, THOMAS & SCHEICKL, 2015) – elle est aussi susceptible d'engendrer des problèmes chez les opérateurs humains. Il s'agit entre autres de la perte de compétences à long terme, de l'hypovigilance due à des sous charges de travail, du phénomène de contentement qui conduit l'opérateur humain à accepter les décisions de la machine alors qu'elles peuvent être sous optimales, de la surcharge[3] de travail due aux interactions à gérer avec les automatismes. Ces problèmes ont déjà été observés dans le domaine de l'aéronautique ou de l'industrie (BAINBRIDGE, 1983 ; PARASURAMAN, MOLOY & SINGH 1993 ; BAGHERI & JAMIESON, 2004 ; ROVIRA, MCGARRY & PARASURAMAN, 2007 ; DEBERNARD, 2006). Afin de pallier ces problèmes, plusieurs auteurs (NORMAN, BILLINGS, NAGEL, PALMER, WIENER & WOODS, 1988 ; BILLINGS, 1991) ont proposé une philosophie de l'automatisation centrée sur l'homme. Une telle philosophie vise à faciliter les interactions dans un système complexe composé d'un ensemble d'opérateurs humains et de machines interdépendants qui doivent par conséquent interagir pour atteindre un but défini (NAIKAR & SANDERSON, 2001) dans un environnement généralement non totalement prévisible (HOC & DEBERNARD, 2002).

Dans le cadre de cette philosophie, on peut distinguer les approches qui abordent les interactions Homme-Machine en termes d'allocation ou de répartition des fonctions entre l'opérateur humain et la machine, et celles qui traitent de la Coopération Homme-Machine. Cette

[3] La charge de travail est la mesure quantitative ou qualitative du niveau d'activité nécessaire à l'accomplissement d'un travail donné (Sperandio, 1980).

dernière terminologie prend en compte l'interdépendance entre les tâches ou fonctions réparties et réalisées entre agent(s) humain(s) et agent(s) technique(s). L'interdépendance entraîne un besoin de communication et de compréhension partagée de la situation ainsi qu'un besoin de compréhension du fonctionnement de l'autre agent, qui devient alors un partenaire. En conduite automobile autonome en particulier, la notion de « coopération » devient incontournable dans la phase de reprise en main, puisque l'agent humain doit comprendre le fonctionnement de la voiture autonome pour reprendre le contrôle du véhicule en toute sécurité.

Ce chapitre comporte cinq sections principales. La section II traite de la problématique de l'allocation des tâches et de l'allocation de fonctions. La section III présente l'approche statique de l'allocation des fonctions alors que la section IV, quant à elle, se focalise sur l'approche dynamique. Après une analyse critique de ces formes d'allocation, nous aborderons le cadre de la Coopération Homme-Machine dans la section V. La section VI, présentera enfin les difficultés qui peuvent survenir dans le cadre des interactions Humain-Machine.

II. Allocation de tâches et allocation de fonctions

Avant d'aller plus loin, notons que l'emploi des expressions « agent humain » et « agent technique » renverra respectivement, dans ce manuscrit, au conducteur ou à la conductrice et à l'automate.

Le pilotage d'un système dynamique requiert que l'agent humain réalise un ensemble de tâches ou de fonctions, à partir d'objectifs à atteindre qui peuvent être définis par le concepteur du système ou par l'agent humain lui-même comme dans la conduite automobile par exemple. D'après les acceptions courantes, la tâche indique ce qui est à faire (HOC & LEPLAT, 1983). Elle véhicule ainsi l'idée de prescription. Par ailleurs, elle est associée à un but explicite (c'est-à-dire ce qui doit être réalisé) avec des conditions d'exécution définies. Une tâche est donc définie de manière concrète et orientée vers l'action (FULD, 2000). Plusieurs outils tels que le HTA (*Hierarchical Task Analysis*) (ANNETT, 2003) ou l'UAN (*User Action Notation*) (HARTSON & GRAY, 1992) permettent de diviser l'activité d'un agent humain en plusieurs tâches et sous-tâches. Quand on parle d'allocation de la tâche, c'est l'ensemble de la tâche qui est allouée à un agent ou à l'autre (HOC & DEBERNARD, 2002). Cependant, la représentation de ce qu'est une « tâche » est parfois différente entre le concepteur d'un système qui prévoit un ensemble d'opérations à réaliser et l'agent humain qui exécute et qui peut être amené à réaliser des opérations supplémentaires ou à ne pas en exécuter certaines. C'est la raison pour laquelle HOC ET DEBERNARD (2002) relève l'importance de prendre en considération la représentation de la tâche par l'opérateur humain pour en comprendre l'exécution. En effet, les travaux menés au LAMIH (PACAUX-LEMOINE, DEBERNARD, CREVITS & MILLOT, 1996 ; DEBERNARD & HOC, 2003) dans le cadre du trafic aérien ont mis en évidence l'effet négatif d'une allocation de tâches, lorsque la définition de la tâche qui est confiée à la machine ne correspond pas à la représentation qu'en a l'opérateur humain. Ainsi, une allocation des tâches entre des agents humains et des agents techniques ne peut être appropriée que si la représentation de la tâche que se fait le concepteur de la machine correspond à celle que s'en fait l'opérateur humain qui va l'utiliser. Comparativement à l'allocation de la tâche, l'allocation des fonctions aborde les choses de façon différente.

Il existe plusieurs définitions du terme « fonction » selon le domaine dans lequel il est utilisé. Nous utiliserons dans le cadre de nos travaux, celle qui est proposée dans le domaine de la psychologie et des sciences cognitives. PARASURAMAN ET AL. (2000) subdivisent le traitement humain de l'information en quatre fonctions élémentaires : la prise d'information, l'analyse de l'information, la prise de décision et la mise en œuvre de l'action. La fonction est donc, contrairement à la tâche, « *un moyen sans aucun but en soi, mais juste lié à un objectif sur-ordonné* » (HOC & DEBERNARD, 2002, P. 4). Dans le cadre de l'automatique humaine, une fonction apparaît plus générique qu'une tâche et est utilisée pour la réalisation de plusieurs tâches (HOC & DEBERNARD, 2002). Les tâches peuvent en effet être décomposées en un ensemble de fonctions élémentaires.

On trouve, dans la littérature, des études qui portent sur l'allocation de tâches (LEI, TORIIZUKA & ROETTING, 2017 ; RONCONE, MANGIN & SCASSELLATI, 2017) et d'autres qui traitent de l'allocation de fonctions (BOY, 2009). Mais de façon générale, dans un processus d'automatisation ou de conception d'un système Homme-Machine, il est nécessaire de définir les fonctions à répartir entre le(s) agent(s) humain(s) d'une part, et les automates d'autre part.

Initialement, les chercheurs se sont focalisés sur les tâches et les fonctions qui étaient :

- Les plus faciles à automatiser,
- Les plus exigeantes en termes de charge de travail et,

- Les plus critiques en termes de sécurité.

RIEGER ET GREENSTEIN (1982) ont proposé une démarche permettant de définir l'affectation des différentes fonctions entre l'agent technique et l'agent humain au sein du système Humain-Machine de façon statique ou dynamique (Figure 4).

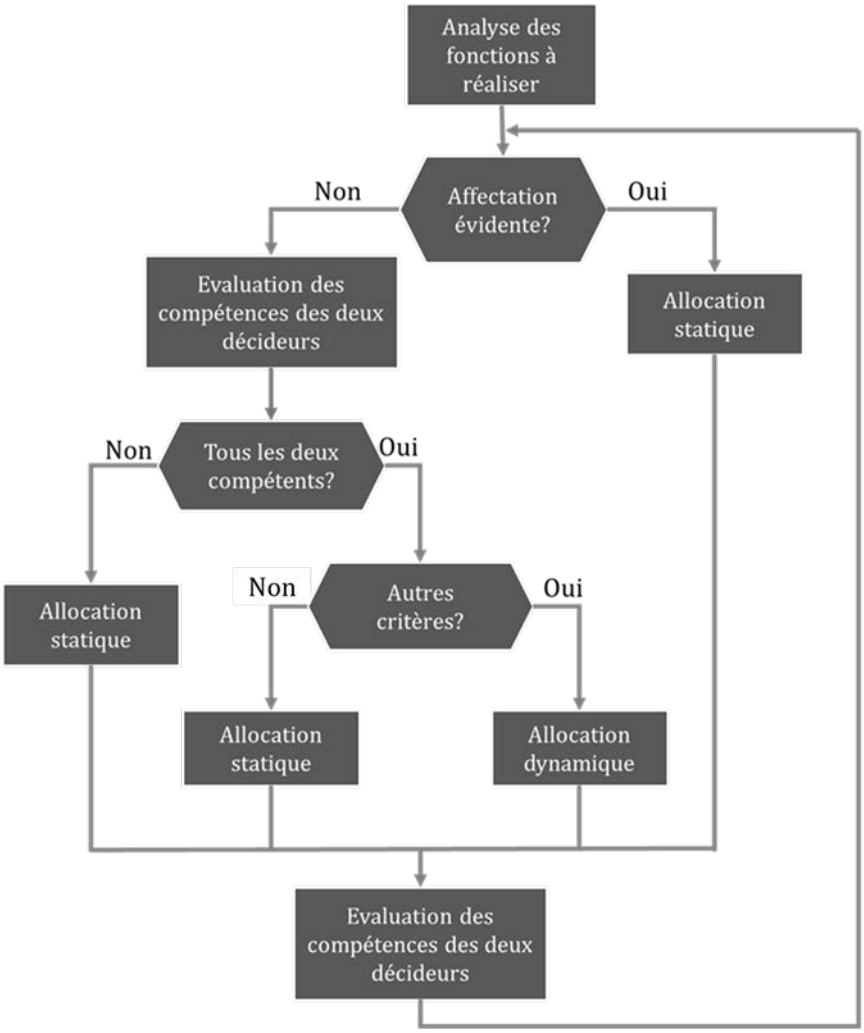


Figure 4: Démarche et définition du degré d'automatisation d'un système Humain-Machine, d'après Rieger et Greenstein (1982)

On peut donc, à partir de différents critères liés notamment aux compétences des agents, déterminer si une fonction peut être automatisée ou non. Lorsqu'un seul agent est capable de réaliser une fonction, l'attribution de la fonction est alors triviale. Dans le cas où il peut être réalisée par les deux agents, l'allocation peut se faire de deux manières : soit de manière fixe, et on parle alors d'allocation statique, soit de manière variable selon un ou plusieurs paramètres, et on parle d'allocation dynamique (SHERIDAN, 1988). Avant d'aborder la problématique de l'allocation dynamique, la section suivante présente les principes de l'allocation statique.

III. Allocation statique

Dans l'allocation statique, la répartition des fonctions est définie et figée au moment de la conception du système technique. La première approche de l'allocation statique est celle développée par FITTS (1951) dans le domaine du trafic aérien. Sur la base de l'acronyme « MABA-MABA » (*Man is Better At-Machine is Better At*), les fonctions sont allouées au plus compétent des agents. La méthode se décline en deux étapes :

1. L'identification des fonctions élémentaires nécessaires à la réalisation d'une tâche,
2. L'identification du meilleur partenaire pouvant réaliser chaque fonction.

La méthode de Fitts a soulevé plusieurs critiques, la principale étant qu'elle ne permet pas de résoudre le problème d'allocation des fonctions. En effet, il aurait fallu que les humains et les machines soient des sous-systèmes comparables pour déterminer quel est le meilleur agent pour réaliser une fonction spécifique (JORDAN, 1963). Humains et machines fonctionnent très différemment. Un aspect particulier de cette différence est que **«** *les machines sont considérées comme très efficaces pour calculer des formules complexes, alors que les humains sont réputés excellents pour gérer des situations inattendues ou inconnues* **»** (HOC, 2004, P. 270). Par ailleurs, dans cette méthode, les fonctions sont prises indépendamment les unes des autres parce que la problématique se résume à attribuer convenablement la fonction au bon agent. Cependant, au-delà du « simple » fait d'attribuer une tâche ou une fonction à un agent ou à un autre, il faut définir comment les différents agents interagissent.

Étant donné que l'automatisation n'est pas uniquement une variable binaire[4], il est nécessaire de définir un continuum pour obtenir un ajustement optimal de ces interactions (PARASURAMAN, 2000 ; BANKS, STANTON & HARVEY, 2014). Une approche différente de celle de Fitts consiste à définir différents niveaux d'automatisation (NdA). Chacun de ces niveaux répond directement à la question « Qui fait quoi ? » contrairement à la méthode de Fitts. La réponse à cette question permet de :

- Répartir les fonctions entre l'agent technique et l'agent humain,
- Organiser le transfert d'informations entre eux,
- Attribuer à l'un ou à l'autre des deux agents l'autorité.

Cette réponse, qui peut être multiple, est structurée à travers un modèle général appelé **taxonomie**. Il existe plusieurs taxonomies présentant des niveaux d'automatisation (VAGIA, TRANSETH, & FJERDINGEN, 2016). Nous présenterons dans cette partie trois d'entre elles :

- La taxonomie de SHERIDAN ET VERPLANCK (1978) dont toutes les autres taxonomies dérivent ;
- La taxonomie de PARASURAMAN ET AL. (2000) à laquelle nous nous référerons ;
- La taxonomie de la *Society of Automotive Engineers (SAE)* qui est une taxonomie spécifique au domaine automobile, et qui constitue la taxonomie-cadre pour nos travaux.

[4] C'est-à-dire qu'on ne saurait uniquement dire d'un système qu'il est totalement automatisé (tout) ou qu'il ne l'est pas du tout (rien) (MCDANIEL, 1988 ; RILEY, 1989 ; SHERIDAN, 1980).

III.1 Taxonomie de Sheridan et Verplanck

SHERIDAN ET VERPLANK (1978) sont les premiers à distinguer dix niveaux d'automatisation (Tableau 1). Aux niveaux 1 et 10, l'intégralité de la tâche, donc l'ensemble des fonctions associées, est allouée respectivement à l'agent humain et à l'agent technique. Aux niveaux 2, 3 et 4, l'agent technique propose des actions à l'agent humain qui choisit de les appliquer ou pas. Aux niveaux 5 et 6, l'agent technique assure l'exécution de ces actions sous le contrôle plus ou moins important de l'agent humain. Aux niveaux 7, 8 et 9, l'agent technique décide et agit seul sur le système à contrôler en modulant l'information transmise à l'agent humain.

Tableau 1 : Les dix niveaux d'automatisation de Sheridan et Verplanck (1978)

Niveau	Description
1	L'agent technique n'apporte aucune assistance.
2	L'agent technique présente un ensemble d'actions alternatives et
3	Restreint ses propositions à quelques-unes
4	Suggère une action
5	Exécute la suggestion si l'agent humain l'approuve.
6	Permet à l'agent humain d'émettre un véto durant un intervalle de temps limité, avant que l'action soit exécutée automatiquement.
7	Exécute l'action automatiquement, puis informe l'agent humain
8	Informe l'agent humain après exécution de l'action, seulement si celui-ci le demande
9	L'agent technique informe l'agent humain après exécution de l'action, seulement si elle le juge utile.
10	L'agent technique décide de tout et agit de façon autonome, en ignorant l'agent humain.

SHERIDAN ET VERPLANK (1978) proposent une taxonomie qui identifie ce que fait l'agent humain et ce que fait l'agent technique à chaque niveau d'automatisation. Cette taxonomie met en évidence les feedbacks et les éléments qui relèvent des fonctions partagées, de la définition des différentes options, de leur sélection et de leur implémentation. En 2000, cette échelle a été révisée par Sheridan lui-même et ses collègues Parasuraman et Wickens.

III.2 Taxonomie de Parasuraman, Sheridan et Wickens

Utilisant une taxonomie bidimensionnelle, PARASURAMAN, SHERIDAN ET WICKENS (2000) proposent d'associer à chacune des fonctions d'*Acquisition (ou prise) de l'information, d'analyse de l'information, de prise de décision et d'implémentation de l'action*, un niveau d'automatisation qui lui est propre (Figure 5).

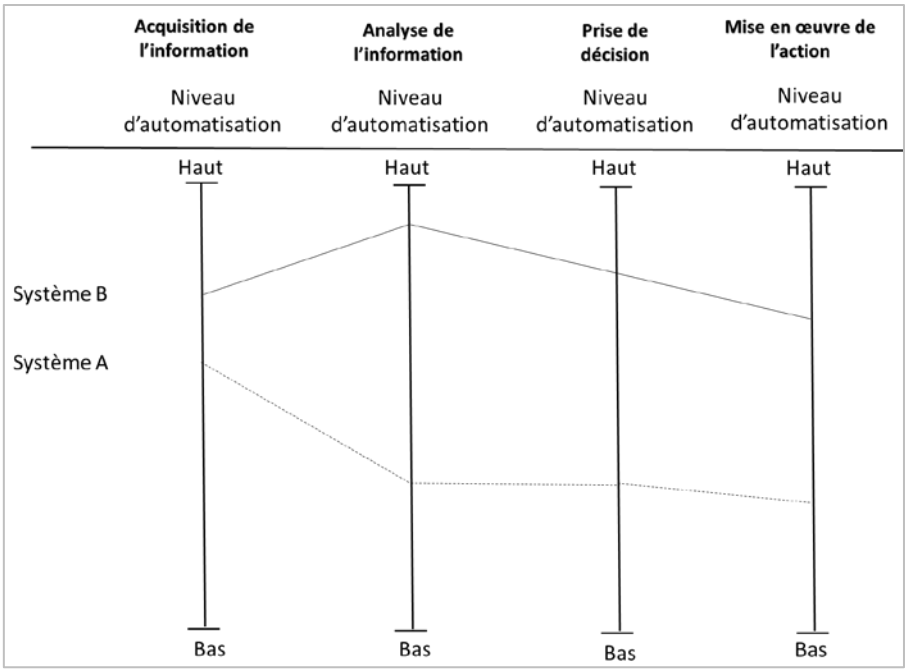


Figure 5: Exemples de systèmes avec des niveaux d'automatisation différents pour chacune des quatre fonctions (Parasuraman & Sheridan, 2000)

Dans la Figure 5, les systèmes A et B ont des niveaux d'automatisation différents pour chacune des quatre fonctions « acquisition de l'information », « analyse de l'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action ». Globalement, pour chacune de ces fonctions, le système A a un niveau d'automatisation inférieur à celui du système B. Cependant, ces niveaux d'automatisation peuvent changer dans le temps (DEBERNARD, 2006). En d'autres termes, si l'on considère que la Figure 5 est une « photo » à un instant *t*, il est possible qu'à l'instant *t+1*, le niveau d'automatisation de la fonction « acquisition de l'information » augmente ou diminue, les autres niveaux d'automatisation restant stables.

DEBERNARD (2006) évoque quelques failles de ce modèle, aux allures pourtant très séduisantes. En effet, tous les niveaux d'automatisation ne sont pas applicables à chacune des fonctions. De plus, le modèle fait apparaître les différentes fonctions comme étant indépendantes alors qu'elles font partie de la même tâche.

Comme nous l'avons mentionné plus haut, il existe d'autres taxonomies notamment celles de KABER, OMAL ET ENDSLEY (1999) ou de RILEY (1989). Si la taxonomie de KABER, OMAL ET ENDSLEY (1999) est très similaire à celle de SHERIDAN ET VERPLANCK (1978), celle de RILEY (1989) se présente sous forme d'une matrice à deux dimensions où les colonnes correspondent à onze niveaux d'automatisation [5] et les colonnes à sept niveaux d'intelligence[6] de l'automate. Chaque case de la matrice correspond à un état d'automatisation, unique et prédéfini. Mais comme nous l'avons mentionné précédemment, nous nous sommes focalisés sur la taxonomie de SHERIDAN ET VERPLANCK (1978) à cause de son caractère précurseur. À côté de ces taxonomies générales, il en existe qui sont spécifiques au domaine de la conduite automobile. Il s'agit par exemple de la

[5] Il s'agit de : Aucun, Unité de fusion de données, Simple aide, Conseiller, Conseiller interactif, Serviteur, Assistant, Associé, Partenaire, Superviseur, Autonome.
[6] Il s'agit de « Données brutes », « procédural », « réponse à contexte », « personnalisé », « réagissant à l'intention supposée », « réponse de l'état de l'agent humain », « prédictif de l'opérateur ».

taxonomie de la *Society of Automotive Engineers* (SAE) que nous présentons dans les lignes suivantes.

III.3 Taxonomie de la Society of Automotive Engineers (SAE)

La SAE fournit une taxonomie qui définit six niveaux d'automatisation pour des véhicules, allant du niveau 0 (pas d'automatisation) au niveau 5 (automatisation totale). Une différence-clé se fait entre le niveau 2 où le conducteur réalise une partie de la tâche de conduite et le niveau 3 où l'automate réalise totalement la tâche de conduite (cf. Tableau 2).

Tableau 2 : Taxonomie de la SAE

Niveau SAE	Nom	Description narrative	Contrôle latéral et contrôle longitudinal	Surveillance de l'environnement de conduite	Reprise de la conduite	Situations de conduite
L'agent humain surveille l'environnement de conduite.						
0	Pas d'automatisation	L'agent humain assure entièrement tous les aspects de la conduite automobile.	Agent humain	Agent humain	Agent humain	n/a
1	Assistance au conducteur	Le système d'assistance au conducteur assure le contrôle latéral ou le contrôle longitudinal à partir des informations de l'environnement de conduite, les autres aspects de la conduite devant être couverts	Agent humain et automate	Agent humain	Agent humain	Quelques situations
2	Automatisation partielle	Plusieurs systèmes d'assistance assurent le contrôle latéral et le contrôle longitudinal.	Automate	Agent humain	Agent humain	Quelques situations
L'agent technique (automate) surveille l'environnement de conduite.						
3	Automatisation conditionnelle	La conduite automobile est entièrement gérée par l'automate, l'agent humain devant répondre de façon appropriée à une demande d'intervention.	Automate	Automate	Agent humain	Quelques situations
4	Automatisation élevée	La conduite automobile est entièrement gérée par l'automate, même si l'agent humain ne répondait pas de façon appropriée à une demande d'intervention.	Automate	Automate	Automate	Quelques situations
5	Automatisation totale	L'automate assure complètement la tâche de conduite sur toutes les routes et conditions environnementales qui peuvent être gérés par l'agent humain	Automate	Automate	Automate	Toutes les situations

De façon générale, les niveaux présentés par la SAE sont descriptifs. En effet, il n'y a pas de mention des fonctions effectivement automatisées. Par ailleurs, ils sont plus techniques que légaux. Un véhicule peut relever de différents niveaux d'automatisation en fonction des systèmes automatisés qui sont activés à bord. Dans le niveau 5 de la SAE, l'automate peut réaliser la tâche de conduite dans toutes les situations (routes, styles de conduite, etc.), tandis que dans le niveau 4, l'automate ne peut assurer la tâche de conduite que sur certains types de routes où il est alors totalement autonome.

Dans la catégorie des taxonomies dédiées à la conduite automobile, on peut également citer la taxonomie de la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) qui comprend cinq niveaux d'automatisation (allant de 0 à 4) et celle de GASSER ET WESTHOFF (2012) qui comprend également cinq niveaux d'automatisation. Le niveau 4 de l'automatisation dans la taxonomie de la NHTSA est divisé en deux niveaux 4 et 5 par celle de la SAE. En effet, dans la NHTSA, au niveau 4, le véhicule est totalement autonome, de son point de départ à son point d'arrivée qui a été préalablement renseigné. Un tel véhicule peut être occupé, c'est à-dire avoir au moins une personne à son bord, ou non. Dans ce dernier cas, il est contrôlé par une personne qui se trouve à distance et qui est susceptible d'agir sur le véhicule si besoin. La taxonomie de Gasser et Westhoff, quant à elle, est très proche de celle de la NHTSA ; elle distingue différents niveaux d'automatisation : conducteur seul, assisté, partiellement automatisé, hautement automatisé et totalement automatisé. Nous retiendrons dans le cadre de cette thèse la taxonomie de la SAE qui est celle utilisée par Renault.

Les taxonomies que nous avons décrites ont toutes un point commun : elles présentent des niveaux extrêmes similaires. En effet, le niveau inférieur correspond toujours à un mode totalement manuel et le niveau supérieur à un mode totalement autonome. Les niveaux intermédiaires (certains plus utilisés que d'autres) sont définis au gré des auteurs. VAGIA, TRANSETH, & FJERDINGEN, 2016 précisent qu'il n'y a pas de moyen d'évaluer la pertinence d'une taxonomie. Ainsi, les concepteurs peuvent prendre les éléments appartenant à des taxonomies différentes et les associer selon les besoins qu'ils souhaitent satisfaire pour en produire une nouvelle. La taxonomie de VAGIA, TRANSETH, & FJERDINGEN, 2016 en est un exemple.

Dans le cadre de l'activité de conduite automobile, la taxonomie de la SAE affirme que les fonctions de la conduite sont souvent partagées entre le conducteur et l'agent automatique. Les niveaux d'automatisation font transiter le rôle du conducteur progressivement d'opérateur actif à celui de superviseur passif (BYRNE & PARASURAMAN, 1996 ; KABER & ENDSLEY, 2004 ; STANTON, WALKER, YOUNG, KAZI, & SALMON, 2007). Cependant, au lieu de remplacer le conducteur, certains auteurs tels que STANTON ET YOUNG (1998), soutiennent que l'automatisation doit venir plutôt l'aider dans la réalisation de la tâche de conduite.

Par ailleurs, les taxonomies présentées suggèrent qu'un niveau d'automatisation spécifié par un concepteur reste le même durant toute la durée de vie du système Homme-Machine. Cependant, il est possible de modifier ce niveau d'automatisation en temps réel au cours de la réalisation d'une tâche : on parle alors d'allocation dynamique. Nous explicitons cette notion dans les paragraphes suivants.

IV. Allocation dynamique

L'allocation dynamique répond à la question « Qui fait quoi et quand ? » L'allocation dynamique renvoie à tout système au sein duquel l'agent humain et/ou l'agent technique peut (peuvent) initier des modifications du niveau d'automatisation en temps réel (SCERBO, 1996). Dans cette section, nous aborderons deux types d'allocations dynamiques : la délégation des fonctions et la répartition dynamique des fonctions.

IV.1 Délégation des fonctions

CASTELFRANCHI (1998) définit la délégation de fonctions comme un cadre de travail dans lequel un agent X requiert l'intervention d'un agent Y et l'intègre dans son plan. Ceci suppose donc que X accorde un certain niveau de confiance à Y qui satisfait aux trois conditions suivantes :

1. X croit que Y est capable d'intervenir ;
2. X a l'objectif que Y intervienne ;
3. X compte sur l'intervention de Y. X s'abstient donc d'intervenir en déléguant à un autre agent et définit ses propres actions en considérant que Y va intervenir.

Il est possible de distinguer deux types de délégations : la délégation ouverte et la délégation fermée. La délégation est ouverte si l'agent X délègue un plan (ou une décision) à l'agent Y qui doit alors déterminer la suite d'opérations et actions à réaliser pour le (la) finaliser. La spécification de l'intervention de Y est donc moins coûteuse à définir qu'une délégation fermée. Néanmoins, il peut y avoir des interférences négatives dues à l'incompréhension de ce que fait ou de ce que veut l'autre agent. Le terme « interférence », selon CASTELFRANCHI (1998), fait référence aux interactions entre les activités des différents agents, qui peuvent être vues positivement (facilitation mutuelle dans la réalisation de la tâche) ou négativement (gêne mutuelle dans la réalisation de la tâche). La délégation est fermée si l'agent X délègue à Y une suite d'actions à mettre en œuvre. L'avantage de ce type de délégation est que X sait exactement ce que Y va faire. Cependant, la définition de l'intervention est plus coûteuse que dans le cas précédent.

L'agent X peut solliciter l'intervention de Y pour deux raisons principales :

1. Un problème de compétences : X n'a pas les compétences requises pour réaliser une tâche alors que Y les a, ou X est moins compétent que Y pour réaliser la tâche. Ceci nécessite donc que X ait un modèle de compétences de Y.
2. Un problème de ressources : X n'a pas les moyens physiques pour réaliser la tâche alors que Y peut le faire ou, X n'a plus les moyens de réaliser la tâche à un moment donné à cause d'une surcharge.

Il est possible de répartir dynamiquement différentes tâches à effectuer entre X et Y en s'appuyant sur ce principe de délégation. En d'autres termes, l'agent X impose à l'agent Y des éléments décisionnels qui vont permettre à Y de décharger X d'une partie du travail par sa capacité non seulement d'être une aide à la décision mais aussi d'être une aide à l'action. Ce concept de délégation de fonctions a été évalué dans le contexte du contrôle de trafic aérien avec le projet AMANDA (DEBERNARD, CREVITS, CARLIER, DENECKER & HOC, 1998). Il est cependant possible de minimiser les interactions entre les décideurs en considérant les tâches indivisibles et en assurant leur répartition entre les différents agents : c'est la Répartition Dynamique de Tâches (MILLOT, 1988) que nous étayons dans les lignes suivantes.

IV.2 Répartition dynamique des tâches (RDT)

En répartition dynamique des tâches, l'allocation se fait en considérant que les tâches ne sont pas divisibles. Quatre conditions sont nécessaires (DEBERNARD, 1993) :

1. Le système Homme-Machine doit être multitâche, c'est-à-dire que plusieurs tâches doivent être réalisées simultanément ou de manière rapprochée dans le temps.

2. Il doit y avoir une variabilité importante des exigences, avec des périodes de sous-charge et de surcharge des opérateurs. Lors des périodes de surcharge, la RDT permet d'attribuer une tâche à l'agent le moins chargé pour un équilibre de charge.

3. Il faut que le système Homme-Machine puisse être automatisé en partie et qu'il soit capable de réaliser les fonctions habituellement exécutées par l'opérateur humain (Figure 6). En effet, un recouvrement des compétences est nécessaire mais la polyvalence totale n'est pas indispensable.

4. L'opérateur doit impérativement être présent au sein du système.

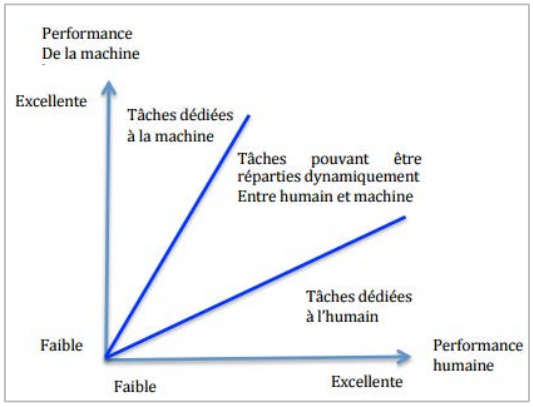


Figure 6: Recouvrement des compétences (d'après Chignell & Hancock, 1985)

L'allocation dynamique permet une meilleure combinaison des compétences de chacun des agents, pour obtenir une meilleure performance du système Homme-Machine (COOK, CORBRIDGE, MORGAN & TURPIN, 1999), en tenant compte des capacités de chacun notamment de la charge de travail de l'agent humain (MILLOT, KAMOUN, SOURMAIL, & WILLAEYS, 1985). Il convient donc, lorsque ce dernier est surchargé et qu'il est incapable de répondre correctement aux exigences des tâches à réaliser, d'allouer une partie des tâches à la machine (DEBERNARD, 1993).

Différentes formes de RDT sont possibles. Chacune d'entre elles est définie par l'agent qui décide et contrôle la répartition des tâches (Tableau 3) : la répartition est explicite lorsque c'est l'agent humain qui la contrôle, alors que la répartition est qualifiée d'implicite lorsque c'est la machine qui la gère.

Tableau 3 : Allocation dynamique implicite et explicite

Agent déclencheur de la réallocation	Machine : Mode Implicite	Agent humain : Mode Explicite
Avantage	Automatisation des règles de décision	Facilité de mise en œuvre Maîtrise de la situation par l'agent humain

Inconvénient	Nécessité d'intégrer des critères de répartition dans le code	Charge de travail supplémentaire pour l'agent humain

Lorsque l'allocation est explicite, la RDT est dite adaptable (MILLOT, 1987). L'agent humain peut alors régler manuellement la réallocation en fonction de sa charge de travail ou d'autres critères qui lui sont propres. Lorsqu'elle est implicite, la RDT est dite adaptative (MILLOT, 1987). Dans cette configuration, c'est la machine qui gère la réallocation ou la redistribution (MORRISON, COHEN & GLUCKMAN, 1993). Celle-ci ne se fait pas aléatoirement et peut être difficile à mettre en œuvre car il faut définir les critères de réallocation dès la conception, ce qui peut nécessiter des points de mesure sur le système Humaine-Machine tels que la charge de travail humaine, ou bien des modèles de comportement ou de performance. DEBERNARD, VANDERHAEGEN ET MILLOT (1993) ont comparé l'impact du mode implicite et du mode explicite sur l'activité du contrôleur aérien. Ils ont montré en particulier que, le mode implicite était moins apprécié par les contrôleurs que le mode explicite. En effet, dans le mode implicite, les contrôleurs étaient inquiets de leur maîtrise de la situation, ce qui n'était pas le cas dans l'autre mode. Cependant, le mode implicite avait permis d'améliorer les performances globales du système et de mieux réguler la charge de travail humaine.

Pour tenir compte des avantages et inconvénients de ces deux modes, CREVITS (1996) a défini la répartition mixte. Dans ce mode, la répartition peut être réalisée aussi bien par l'opérateur humain que par la machine, avec bien entendu un arbitrage final à décider. Par ailleurs, la répartition peut être qualifiée d'interne, c'est-à-dire gérée par les agents humains ou techniques pour une tâche considérée (Figure 7), ou externe si elle est gérée par un tiers (Figure 8).

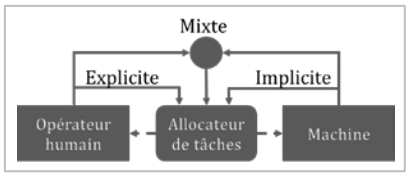


Figure 7: Répartition interne, explicite, implicite et mixte (Crévits, 1996)

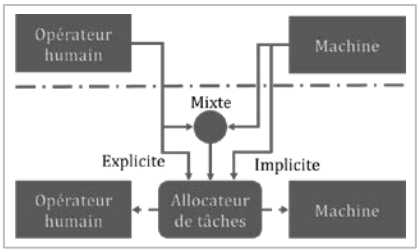


Figure 8 : Répartition externe, explicite, implicite et mixte (Crévits, 1996)

Qu'elle soit implicite ou mixte, il est indispensable de définir des critères et des mesures de réallocation ou de redistribution des tâches.

- **Performance et compétences des agents** : Lorsque la performance de l'opérateur humain se dégrade à cause de facteurs psychologiques ou physiologiques, il peut être pertinent de décider d'une répartition plus adéquate des tâches (DEBERNARD, 1993). Par ailleurs, les compétences de l'agent technique peuvent fluctuer en fonction de la complexité de la tâche. En effet, plus la tâche est complexe, plus l'agent automatique doit avoir des compétences élevées pour pouvoir la réaliser.

- **Charge de travail globale a priori** : Tout l'enjeu est de maintenir la charge de travail de l'agent humain à un niveau intermédiaire acceptable en allouant plus de tâches à l'agent technique pendant les pics d'activité. Il y a ainsi une régulation de la charge cognitive de l'opérateur (MILLOT & DEBERNARD, 1993 ; HILDEBRANDT & HARRISON, 2003) qui contribuerait à une optimalité du système Humain-Machine, ou tout du moins à éviter que l'opérateur humain se trouve dans une situation où il serait incapable de gérer correctement les tâches qui lui sont attribuées.

- **Conditions/Contraintes de production** : Leur évolution dans le temps peut entraîner des périodes de charge de travail élevée et des périodes de charge faible chez l'opérateur humain (CAHOUR & FALZON, 1991).

D'autres critères peuvent pris en compte pour décider de cette réallocation : le besoin d'assistance de l'agent humain, la complexité du système et la nécessité de surveillance par l'agent humain (DEBERNARD, 1993 ; HILBURN, MOLLOY, WONG & PARASURAMAN, 1993 ; SCERBO, 1996 ; KABER & ENDSLEY, 2004). S'il apparaît clairement que l'allocation dynamique est plus avantageuse que l'allocation statique, elle ne prend pas en compte l'interdépendance entre les agents. La considération de cette interdépendance associée à la répartition des fonctions est en revanche totalement intégrée dans la notion de « coopération ». Dans le cadre d'un système Homme-Machine, on va donc favoriser la coopération dite Homme-Machine sur laquelle nous portons une attention particulière ci-après.

V. La Coopération Homme-Machine

La notion de « coopération Homme-Machine », dans le cadre des situations dynamiques, émerge avec un article de HOLLNAGEL ET WOODS (1983) qui appréhendent les systèmes Homme-Machine comme des systèmes cognitifs conjoints. Selon eux, « *un système peut être décrit soit comme un tout, soit comme une collection d'éléments* ». Ils précisent que lorsqu'un système est constitué uniquement d'agents humains ou lorsqu'il associe agents humains et agents techniques, **«** *le tout est plus que la somme des parties* **»** (HOLLNAGEL & WOODS, 1983, P. 586). Un système cognitif couplé comprend l'homme, la machine, mais également le système global en lui-même dans une approche holistique (HOLLNAGEL, 2003). L'adjectif qualificatif « cognitif » dans le terme « système cognitif conjoint » renvoie à la capacité du système à modifier son comportement sur la base de son expérience, de manière à garder le contrôle en cas de perturbations (HOLLNAGEL & WOODS, 2005). L'adjectif qualificatif « conjoint », quant à lui, suggère que le système peut être décomposé en plusieurs parties. Parmi les systèmes cognitifs conjoints, on peut citer par exemple un système composé de deux personnes au moins (INAGAKI, 2010).

En considérant les travaux sur la coopération Homme-Machine, deux types de classification peuvent être proposés :

1. Une classification prescriptive ou descriptive qui regroupe les travaux qui traitent de la définition de la coopération ;
2. Une classification fonctionnelle ou structurelle qui renvoie aux travaux qui mettent en évidence la nature des relations (hiérarchique, démocratique, etc.) entre les agents.

Nous présentons cette dernière classification parce qu'elle est directement en relation avec les fonctions qui entrent en jeu dans un système. De plus, elle nous permettra de mieux comprendre les interactions entre l'agent humain et l'agent technique de manière pratique dans nos travaux. Avant d'aller plus loin, nous définissons la coopération Humain-machine dans les lignes suivantes.

V.1 Définition

« *Coopérer dans l'action, c'est opérer en commun, c'est-à-dire ajuster au moyen de nouvelles opérations… les opérations exécutées par chacun des partenaires… c'est coordonner les opérations de chaque partenaire en un seul système opératoire dont les actes mêmes de collaboration constituent les opérations intégrantes* **»** (PIAGET, 1977). HOC (1996) propose de définir la coopération Homme-Machine en termes de gestion des interférences. En effet, il précise que deux agents sont dans une situation de coopération s'ils remplissent les deux conditions suivantes :

1. *Chaque agent poursuit des buts qui peuvent entrer en interférence, soit au niveau des résultats, soit au niveau des procédures.*

2. *Chaque agent gère l'interférence pour faciliter les activités individuelles et/ou la tâche commune si elle existe.*

Dans cette définition opérationnelle, le terme « interférence » est à prendre au sens de CASTELFRANCHI (1998). Ainsi elle peut être positive ou négative. Quand elle est positive, l'interaction entre les activités des différents agents conduit à une amélioration de la représentation partagée du contexte. Quand elle est négative, un conflit apparaît entre les

activités individuelles de chaque agent. HOC (2011) définit trois niveaux de coopération (Figure 9) :

- **Niveau 1 : La coopération dans l'action.** À ce niveau, les activités coopératives visent la création, la détection, l'anticipation et la résolution des interférences. La grande majorité des assistances visant l'amélioration de la sécurité lors de situations critiques interviennent à ce niveau de coopération. À titre d'exemple, on peut évoquer les Dispositifs d'Aide au Maintien dans la voie (DAM). Ceux-ci interviennent directement au niveau de l'action (NAVARRO, 2016). Assistance et conducteur partagent la tâche de guidage du véhicule grâce au volant, ce qui implique que les actions de l'un influent directement sur les actions de l'autre (GRIFFITHS & GILLESPIE, 2005).

- **Niveau 2 : la coopération dans la planification**. La planification est considérée au sens large par HOC (1988), c'est-à-dire comme la génération des représentations schématiques utilisées pour guider l'activité. À ce niveau, la coopération implique la représentation de l'environnement et la représentation de l'activité du système Humain-Machine. La communication des éléments de contexte n'est nécessaire que si les agents n'ont pas les mêmes représentations de la situation dans laquelle se trouve le système Homme-Machine. Ce niveau de coopération n'a pas encore fait l'objet de l'attention des chercheurs dans le contexte de la conduite automobile.

- **Niveau 3 : La métacoopération.** La métacoopération vise à faciliter la coopération dans la planification et la coopération dans l'action. Elle comprend un ensemble de paramètres qui permettent aux agents de comprendre ce qu'ils font ensemble. Les modèles exacts des agents en particulier permettent de calibrer la confiance qu'un agent accorde à un autre, en anticipant l'intention et l'action de l'autre agent pour qu'elles n'interfèrent pas avec les siennes (HOC, 2007).

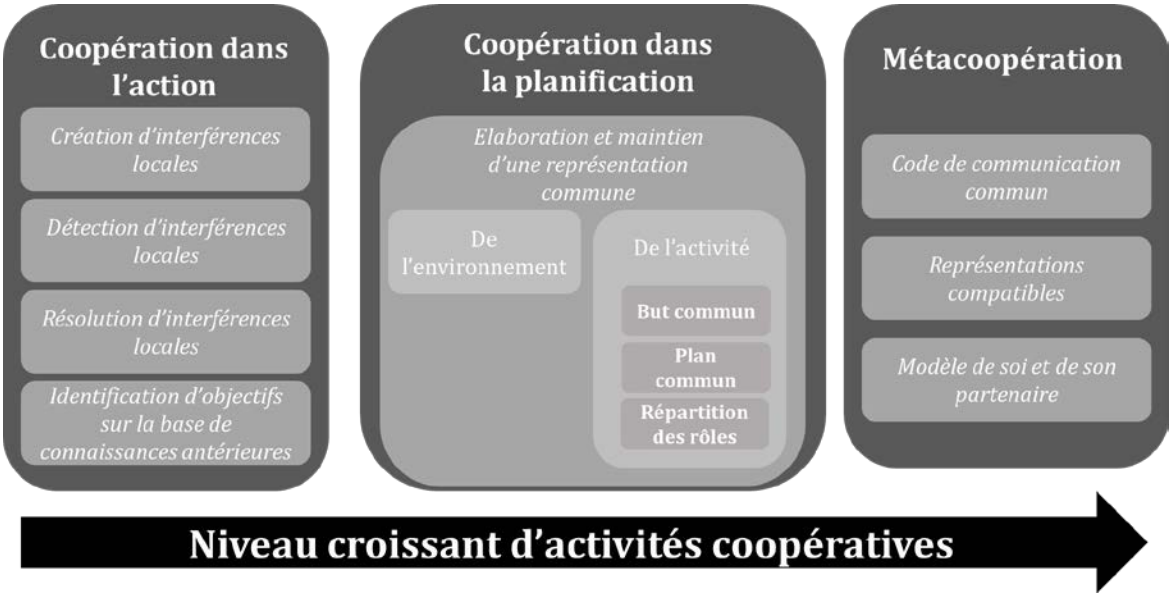


Figure 9 : Les activités coopératives d'après Hoc (2001a)

Les travaux de HOC ET LEMOINE (1998) dans le cadre du contrôle du trafic aérien, ont montré que l'information partagée sur l'action permet de réduire le besoin de produire des représentations des niveaux plus élevés. S'il est vrai qu'il est plus facile de mettre en œuvre la coopération au niveau de l'action comparativement à des niveaux plus abstraits (surtout quand

l'intelligence de la machine est limitée), cette coopération n'est néanmoins pas suffisante. Ceci est d'autant plus vrai pour les activités dans lesquelles des procédures doivent être suivies. Par exemple, dans le domaine de l'aviation, les pilotes ont besoin d'explication à un niveau d'abstraction élevée pour pouvoir suivre les procédures convenablement (KARSENTY, 2000).

Plusieurs auteurs ont considéré que la coopération Homme-Machine implique un but commun partagé par les agents (GRICE, 1975 ; BAGNARA, RIZZO, & FAILLA, 1994). Cependant le rôle de ce but commun n'est pas appréhendé de la même façon par tous. D'aucuns considèrent que ce but a un rôle moins important que les buts poursuivis par chaque agent (SCHMIDT, 1991, 1994 ; ROGALSKI, 1994) contrairement à d'autres qui mettent l'accent sur un espace de travail commun comme base de la coopération (HOC, 2001). Nous précisons ce qu'est un espace de travail commun dans la sous-section suivante, car nous faisons l'hypothèse que dans la conduite autonome, l'agent humain et l'automate devront en avoir un pour coopérer convenablement.

V.2 Espace de travail commun ou *Common Work Space*

Dans le cadre d'une situation de coopération, certains auteurs comme GRICE (1975) mettent l'accent sur l'importance de disposer d'une représentation, d'une croyance et d'une connaissance partagées entre les agents. Cette représentation partagée est désignée par le vocable « référentiel commun » en français (DE TERSSAC & CHABAUD, 1990) ou par le vocable anglo-saxon « *Common Frame of Reference* » *ou COFOR* (HOC, 2000). Ce référentiel commun, élaboré et mis à jour à partir des connaissances communes et des communications qui s'établissent entre les différents agents, a plusieurs attributs (PACAUX-LEMOINE & DEBERNARD, 2002) (Figure 10) :

- L'information résultant des activités d'élaboration d'information.
- Les problèmes résultant des activités d'identification ;
- Les stratégies résultant des activités de prise de décision schématique ;
- Les solutions résultant des activités de prise de décision précise ;
- Les commandes résultant des activités d'implémentation de solutions.

Pour coopérer, les agents humains se transmettent des informations, des problèmes, des stratégies, des solutions et des commandes pour partager leur propre cadre de référence. Ensuite, ils construisent un référentiel virtuel commun (HOC, 2001).

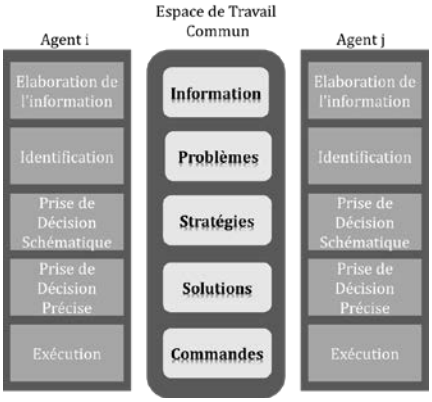


Figure 10: Définition d'un espace de travail commun (Debernard, 2009)

Dans le domaine de la coopération Humain-Machine, les agents doivent disposer d'un espace de travail commun ou « Common Work Space » ou CWS (DEBERNARD ET AL., 2009 ; DEBERNARD, RIERA, & POULAIN, 2014), le CWS constituant une représentation physique du COFOR (Figure 10). Les informations issues des fonctions automatisées peuvent être représentées sur le

CWS grâce à une interface. L'opérateur humain peut alors accéder à ces informations, en fournir à l'automate et détecter des interférences possibles. Réciproquement, l'automate peut à partir des informations existantes, détecter des interférences (DEBERNARD, 2006). Prenons l'exemple du projet AMANDA, qui visait à évaluer le principe de délégation de tâches entre les contrôleurs aériens et un agent technique (DEBERNARD, CATHELAIN, CREVITS & POULAIN, 2002). Pour permettre aux agents en présence de coopérer, un espace de travail commun a été implémenté pour favoriser les activités coopératives (Figure 11). Le modèle proposé par PARASURAMAN ET AL. (2000) (prise d'information-analyse de l'information-prise de décision-implémentation de l'action) a été utilisé par les auteurs pour définir l'espace de travail commun. Deux expérimentations ont été menées. La première expérimentation a permis de définir le contenu effectif de l'espace de travail commun dans le domaine du contrôle aérien. Quant à la deuxième, elle a montré que cet espace de travail peut améliorer les activités de coopération (DEBERNARD ET AL., 2009).En effet, l'espace de problèmes est mieux défini et il y a moins de conflits entre les agents. De plus, chaque agent comprend mieux la décision de son partenaire. Ainsi, dans nos travaux en conduite automobile, nous chercherons à identifier les informations qui alimenteront cet espace de travail commun, notamment pour que l'agent humain comprenne ce que fait la voiture autonome.

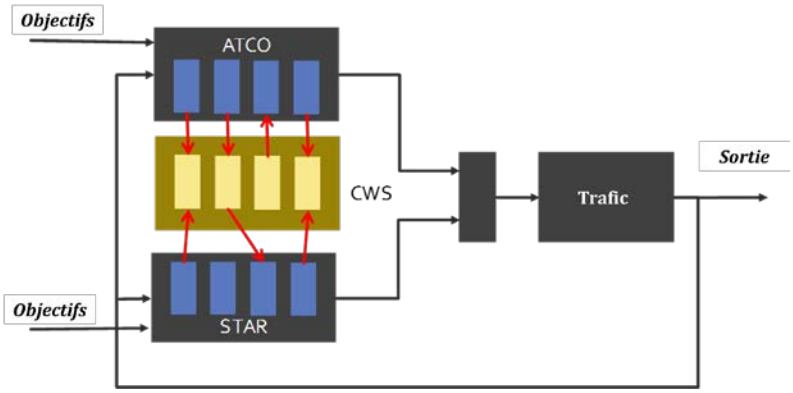


Figure 11 : Coopération entre agents grâce à un espace de travail commun(CWS). ATCO= Air Traffic Controller » (Contrôleur Aérien) ; STAR= Système Tactique d'aide à la Résolution.

Qu'il s'agisse de coopération humain-humain ou de coopération Humain-Machine, la définition d'un espace de travail commun consiste à fournir un support d'informations afin d'aider les décideurs dans leurs activités coopératives. Il est nécessaire, cependant, de définir la manière dont les activités de ces décideurs vont se répartir, ce qui peut conduire à différentes taxonomies de coopération.

V.3 Taxonomies de la coopération

Deux taxonomies se distinguent : la taxonomie de SCHMIDT (1994) qui traite des formes de coopération et celle de HOC, YOUNG ET BLOSSEVILLE (2009) qui traite des modes de coopération.

a) La taxonomie de Schmidt (1994)

D'un point de vue sociologique, SCHMIDT (1994) a défini trois formes de coopération qui intègrent l'allocation des fonctions et les relations entre les différents agents.

- **La coopération augmentative** : Dans cette forme de coopération, les agents qui coopèrent ont des compétences similaires. Ils sont donc « interchangeables ». Ils coopèrent pour palier une surcharge de travail qu'un seul agent ne pourrait gérer.

- **La coopération intégrative** : Dans cette forme de coopération, les agents en présence ont des compétences différentes. Ils sont « spécialisés » et complémentaires pour la réalisation de la tâche. Ainsi, cette dernière est subdivisée en plusieurs sous-tâches et chaque sous-tâche est attribuée à un agent en fonction de ses compétences. Une telle coopération serait manifeste dans le cas où la voiture autonome ne saurait pas faire le changement de voie, alors que l'agent humain peut le faire.

- **La coopération débative** : Les agents ont ici des compétences similaires et ils coopèrent de manière à trouver la meilleure solution à un problème donné. Ils peuvent donc être amenés à trouver des solutions différentes à un même problème et devront donc gérer les interférences entre eux.

Cette approche permet, sur la base de l'espace de travail commun, de modéliser complètement un système coopératif (DEBERNARD, ANNEBICQUE, CREVITS & POULAIN, 2008). On y distingue deux aspects : le savoir-faire et le savoir-coopérer (PACAUX-LEMOINE & DEBERNARD, 2002). Le savoir-faire, qu'un agent façonne sur la base de ses expériences et de ses aptitudes, représente l'intelligence nécessaire à la résolution d'un problème. Le savoir-coopérer désigne l'ensemble des activités coopératives qu'un agent est en mesure de réaliser pour échanger (une information ou une décision) de façon plus ou moins explicite avec un autre agent afin de gérer les interférences, négatives notamment, entre eux.

La taxonomie de HOC ET AL. (2009) constitue une approche différente. Elle utilise la notion d'interférences pour définir des modes de coopération.

b) La taxonomie de Hoc, Young et Blosseville (2009)

HOC ET BLOSSEVILLE (2003) ont proposé une catégorisation des assistances à la conduite en quatre modes de coopération. Celle-ci a été reprise par HOC ET AL. (2009). Elle comprend :

- **Le mode perceptif**. Ce mode complète les informations perçues par le conducteur pour rendre aussi complète que possible la représentation mentale qu'il a de l'environnement, ceci de deux manières possibles. D'une part, il peut rendre plus perceptible des informations présentes dans la scène visuelle ; il s'agit par exemple de rendre plus visibles un piéton ou des bords de voie lorsque la visibilité est réduite. D'autre part, il permet de communiquer au conducteur des informations que celui-ci ne peut percevoir directement. Pour l'un ou l'autre cas, différentes modalités sonores, visuelles ou haptiques peuvent être utilisées. Il est néanmoins important de spécifier correctement ces modalités en fonction de l'information à communiquer.

- **Le mode contrôle mutuel.** Ce mode vise à « critiquer le comportement du conducteur », ce qui suppose que le système d'assistance réalise « virtuellement » la même tâche que celle que le conducteur est en train d'exécuter. Si une différence apparaît entre la décision prise par le conducteur et celle qu'aurait prise le système, alors ce dernier prévient le conducteur. Cependant, la mise en œuvre de l'assistance peut varier en fonction du type de contrôle mutuel :
    - ***Mode avertissement***. Dans ce mode, l'assistance ne fait qu'avertir le conducteur, de façon auditive, visuelle, ou haptique. Le moment de déclenchement de l'avertissement doit être en adéquation avec l'évaluation réelle du danger. Les Dispositifs d'Avertissement aux Sorties de voie (DAS) appartiennent à ce mode. Ces dispositifs alertent les conducteurs sur un positionnement latéral jugé dangereux.

- ***Mode suggestion d'action***. L'assistance est plus intrusive. Elle ne fait pas qu'avertir mais elle incite le conducteur à faire une action d'une certaine manière. Parmi les dispositifs entrant dans cette catégorie, on peut citer l'amorçage moteur, terme repris des travaux de NAVARRO (2008), qui se déclenche lorsque le véhicule se trouve proche d'une sortie de voie. Il génère alors un mouvement du volant pour maintenir le véhicule dans le centre de voie.
- ***Mode limitatif***. Si le mode précédent incite le conducteur à réaliser une action, ce mode, quant à lui, indique au conducteur ce qu'il ne faut pas réaliser. Il y a donc ici une restriction dans ses possibilités d'action.
- ***Mode contrôle partagé.*** L'assistance agit ici de façon corrective pour le maintien de la trajectoire.

- **Le mode délégation de fonction**. Dans ce mode de coopération, le conducteur choisit de confier une partie de l'activité de conduite de façon durable à l'assistance. Dès lors, le conducteur évolue vers le rôle de superviseur. En effet, il doit s'assurer que ce qui est fait par l'automate est en adéquation avec la dynamique de l'environnement et les objectifs qu'il s'est fixé. Un exemple d'assistance dans cette catégorie est le *Cruise Control* (CC) auquel le conducteur peut déléguer le contrôle longitudinal de son véhicule.

- **Le mode complètement automatisé**. Il y a une délégation totale de la tâche de conduite à l'automate. L'assistance assure les contrôles latéral et longitudinal du véhicule.

Comme nous l'avons mentionné dans les sections précédentes, le niveau d'automatisation dans le projet LRA est le niveau 4 selon la taxonomie de la SAE. D'aucuns pourraient penser qu'il n'est pas nécessaire de penser la coopération lorsque le véhicule a atteint un tel niveau d'autonomie. Cependant, nous faisons l'hypothèse, à valider, que la seule observation par l'agent humain des comportements de l'agent technique n'est pas suffisante pour permettre une compréhension convenable de ce que fait le véhicule. Par conséquent, l'agent technique doit fournir à l'agent humain des informations relatives à son fonctionnement, qu'il s'agisse de la prise de l'information, de l'analyse de l'information, de la prise de décision ou de l'action (Figure 12). Agent humain et agent technique doivent donc coopérer.

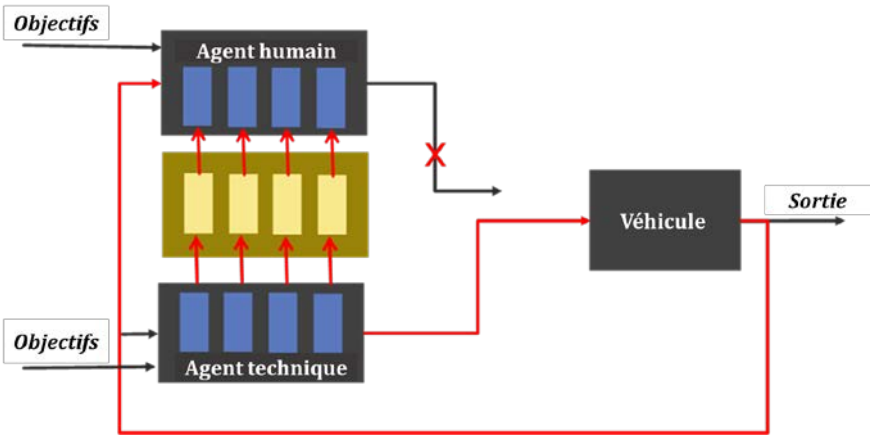


Figure 12 : La Coopération Homme-Machine dans le domaine de la conduite automobile

Si la coopération Homme-Machine semble intéressante, elle soulève néanmoins quelques problèmes que nous évoquons dans la section suivante.

VI. Difficultés liées aux interactions Homme-Machine

Les travaux qui ont été consacrés aux difficultés liées aux interactions entre l'humain et la machine ont été majoritairement réalisés dans le domaine de l'aviation, précurseur en matière d'automatisation centrée sur l'opérateur humain. Ces travaux ont montré que les problèmes d'interaction entre l'humain et la machine concernent essentiellement les niveaux d'automatisation extrêmes. En ce qui concerne les niveaux élevés d'automatisation, la revue de la littérature fait largement état des effets négatifs qu'ils engendrent (BAINBRIDGE, 1983 ; PARASURAMAN, MOLLOY, & SINGH, 1993). Les erreurs humaines sont, non pas éliminées, mais modifiées. Quatre grandes difficultés émergent :

1. **Une perte d'expertise**. On observe une dégradation des compétences et des savoir-faire. L'agent humain a tendance à avoir une performance réduite quand il passe du rôle d'acteur à celui de superviseur. Ceci semble paradoxal dans la mesure où l'un des avantages vantés de l'automatisation est le maintien des habiletés de l'agent humain (BAINBRIDGE, 1983).

2. **Une perte d'adaptabilité**. Les prises de décision peuvent se complexifier à cause de l'accroissement de la quantité d'informations à traiter et de l'apparition « d'information masquée » : l'opérateur n'a pas toujours accès à la bonne information au bon moment.

3. **Un phénomène de contentement.** Ce phénomène pousse l'agent humain « *à se contenter de la solution apportée par l'automate, même quand il est suffisamment expérimenté et qu'il est au fait des limitations de la machine* » (HOC, 2004). Le contentement désigne un état psychologique caractérisé par un faible taux de suspicion (WIENER, 1981, P. 117), phénomène déjà été relevé en ce qui concerne l'utilisation de l'ACC (WARD, FAIRCLOUGH, & HUMPHREYS, 1995 ; STANTON, YOUNG, WALKER, TURNER, & RANDLE, 2001). Cela pose la question du partage de la supervision.

4. **Le contournement de l'assistance.** Il peut faire suite à une interférence négative entre l'homme et l'assistance ou se faire en amont de l'attribution d'une tâche à la machine (mettre ma thèse). Ainsi l'agent humain n'utilise pas l'automate pour ce qu'il est réellement capable de faire.

Ces problèmes évoquent le phénomène de l'humain hors de la boucle[7] (KABER ET ENDSLEY, 1997). Lorsqu'il est hors de la boucle de contrôle, l'agent humain est en effet incapable de gérer le système automatique en cas d'imprévus, et de reprendre le contrôle de la situation dans des conditions satisfaisantes ; à plus long terme, il peut perdre son expertise.

[7] Le vocable anglo saxon connu est out-of-the-loop (ENDSLEY & KABER, 1999 ; EPHRATH & YOUNG, 1981)

VII.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la question de l'interaction entre un agent humain et un agent technique dans un système automatisé, en faisant référence à la notion d'allocation des fonctions ou des tâches, celle-ci pouvant être statique ou dynamique. Dans le cadre de l'allocation statique, nous avons présenté plusieurs taxonomies qui définissent des niveaux d'automatisation. Nous avons présenté en particulier la taxonomie de la SAE qui a été utilisée dans le cadre du projet LRA. Le véhicule autonome, qui est l'objet de ce projet, est fortement automatisé ; l'automate assure les contrôles latéral et longitudinal sur des portions d'autoroute bien définies, ce qui correspond au niveau 4 dans la taxonomie de la SAE. À ce niveau d'automatisation, la reprise en main doit être réalisée lorsque le véhicule s'apprête à sortir des conditions d'utilisation de l'automate. Nous avons donc également présenté l'allocation dynamique qui prend en compte le facteur « temps » et le fait qu'en fonction des conditions, une tâche ou une fonction peut être allouée soit à l'humain, soit à la machine.

Par ailleurs, nous avons présenté le concept de Coopération Homme-Machine. Outre les différentes taxonomies relatives à ce concept, nous avons relevé l'importance d'un référentiel commun à partir duquel un agent humain et un agent technique peuvent échanger des informations pour des actions opportunes dans une situation de travail. Les travaux menés par DEBERNARD (1993) dans le domaine du contrôle de trafic aérien incitent à penser que le conducteur et la voiture autonome devraient également disposer d'un référentiel commun. En effet, celui-ci permettrait au conducteur humain de comprendre le fonctionnement du véhicule autonome d'une part, afin de reprendre convenablement la main d'autre part.

Enfin, nous avons mentionné les limites de l'automatisation, liées notamment au phénomène de l'humain hors de la boucle de contrôle. Ce phénomène peut être à l'origine d'une dégradation de la compréhension de la situation – concept appelé dans la littérature *Situation Awareness* - et conduire à une dégradation des performances du système humain-machine. Le concept de *Situation Awareness* est donc central et sera présenté dans le chapitre suivant, en se focalisant dans le domaine de la conduite automobile.

Chapitre II. **Situation Awareness et conduite automobile**

I. Introduction

Dans les tâches qui s'effectuent dans des environnements dynamiques tels que la conduite automobile ou le contrôle du trafic aérien, il est important pour l'agent humain de suivre l'évolution de la situation. En conduite automobile par exemple, les conducteurs doivent connaître la position de leur véhicule dans l'environnement routier ainsi que celle des autres, la vitesse de leur véhicule et celle des autres, la topologie de la route, etc. (GUGERTY, 1997). Par ailleurs, les conducteurs doivent prédire comment ces variables vont évoluer dans un futur proche pour prendre de bonnes décisions, non seulement en ce qui concerne la navigation, et les manœuvres, mais aussi la réalisation d'autres sous-tâches. Tous ces éléments de perception, de compréhension et de projection nécessaires pour la réalisation des tâches en temps réel sont encapsulés dans la notion de *Situation Awareness* (ENDSLEY, 1995). Dans la suite de ce manuscrit, nous continuerons à utiliser le vocable anglo-saxon *Situation Awareness*, ou son acronyme, SA, pour rester fidèle au sens originel et éviter toute connotation philosophique à cause de la traduction en français du mot « Awareness » par « Conscience ».

Les premières discussions concernant la SA apparaissent dans le domaine de l'aviation (ENDSLEY, 1987, 1988 ; FRACKER, 1988). Ensuite, le concept se répand très rapidement pour être utilisé et appliqué dans d'autres domaines tels que le domaine militaire (ENDSLEY, 1993), les transports (MA & KABER, 2007; CHAUVIN, CLOSTERMANN & HOC, 2008), le sport (MACQUET & STANTON, 2014; NEVILLE & SALMON 2016), la santé et la médecine (BLEAKLEY, ALLARD & HOBBS, 2013; FIORATOU, FLIN, GLAVIN & PATEY, 2010), le contrôle des processus (SALMON, STANTON, WALKER, JENKINS, BABER & MCMASTER, 2008; SNEDDON, MEARNS & FLIN, 2015) et les services d'urgence (BLANDFORD & WONG, 2004; SEPPÄNEN, MÄKELÄ, LUOKKALA & VIRRANTAUS, 2013) pour n'en citer que quelques-uns. Au cours des dernières décennies, la SA est devenue un objectif de conception important (ENDSLEY, & GARLAND, 2000) notamment avec l'avènement des systèmes automatisés. On sait, en effet, que de hauts niveaux d'automatisation s'accompagnent parfois d'une perte de SA (ENDSLEY, 1988, 1995). Pour limiter le risque de sa dégradation dû à l'automatisation, ENDSLEY (1996) énonce quelques principes à prendre en compte lors de la conception des IHM.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire vise la conception d'une IHM permettant à l'agent humain de comprendre son environnement de conduite ainsi que le fonctionnement de l'automate pour qu'il puisse reprendre en main le véhicule en toute sécurité. Ce chapitre aborde donc la notion de SA pour identifier les liens entre celle-ci et la conception des interfaces dans la conduite automobile en particulier. Il est divisé en trois sections principales. Dans la section II, nous présenterons les différentes théories et modèles de la *Situation Awareness*. Nous mettrons en évidence le modèle que nous avons choisi, celui d'ENDSLEY (1988, 1995). Nous établirons la complémentarité entre ce modèle et une notion similaire qu'est « la représentation mentale ». Les facteurs qui influencent la conduite automobile manuelle seront présentés dans la section III ; une attention particulière sera accordée aux critères que doivent respecter les interfaces pour favoriser la SA de l'agent humain. Nous nous focaliserons dans la section IV de ce chapitre sur la représentation mentale de l'agent humain dans des voitures hautement automatisées. Nous l'aborderons notamment dans le cadre de la phase de reprise en main du véhicule par l'agent humain et en lien avec le problème de confusion de modes inhérent à la supervision de tout système fortement automatisé. Nous préciserons également notre choix d'utiliser la Réalité Augmentée pour améliorer la représentation mentale de l'agent humain de son environnement de conduite.

II. Les modèles de la *Situation Awareness*

La SA d'un individu peut être décrite comme « *la connaissance de ce qui se passe autour de lui* » (JONES, 2015, P. 33). Cependant, il n'y a pas de définition universellement acceptée de la SA. Des différences claires existent dans la façon dont les chercheurs abordent ce concept en fonction de la discipline (ergonomie, ingénierie, psychologie) à laquelle ils appartiennent. De façon générale, il existe trois catégories de modèles qui permettent d'appréhender la SA. Une synthèse de ces modèles a été proposée par STANTON, SALMON, WALKER, SALAS ET HANCOCK (2017). Il s'agit de :

- **Les modèles qui traitent de la SA d'un individu** (ENDSLEY, 1995 ; BEDNY & MEISTER, 1999 ; SMITH & HANCOCK, 1995). Ils se focalisent, comme leur nom le suggère, sur les individus qui sont des agents humains et sur la façon dont ils construisent et maintiennent la SA durant la réalisation de leur tâche. Trois définitions principales de la SA d'un individu émergent de ces modèles. Une première définition l'appréhende comme « *la perception des éléments de l'environnement à l'intérieur d'un volume spatio-temporel, la compréhension de leur signification et la projection de leur état dans un futur proche* » (ENDSLEY, 1988). Une deuxième approche considère la SA d'un individu comme « *la réflexion consciente et dynamique d'une situation par un individu* »[8] (BEDNY & MEISTER, 1999). Quant à la troisième définition, elle fait référence à la SA d'un individu comme une conscience adaptative dirigée vers l'extérieur (SMITH & HANCOCK, 1995).

- **Les modèles qui traitent de la SA d'une équipe, la *Team Situation Awareness*** (SALAS, PRINCE, BAKER & SHRESTHA, 1995 ; DE SHU & FURUTA, 2005). Dans ces modèles, une équipe est définie comme un ensemble de deux personnes ou plus qui interagissent de façon dynamique, interdépendante et adaptative pour satisfaire une mission qui leur est commune et qu'ils valorisent, chacun d'entre eux ayant des rôles ou fonctions spécifiques à réaliser (SALAS, DICKINSON, CONVERSE & TANNENBAUM, 1992). C'est dans ce cadre que SALAS ET AL. (1995, P 131) définissent la SA d'une équipe comme « *la compréhension partagée d'une situation parmi les membres d'une équipe à un instant donné* ».

- **Les modèles qui traitent de la SA d'un système sociotechnique** (ARTMAN & GARBIS, 1998 ; NEVILLE & SALMON, 2016 ; SALMON ET AL., 2008 ; STANTON, SALMON, & WALKER, 2015 ; SALMON, WALKER, & STANTON, 2016 ; STANTON ET AL., 2009, 2010). Dans ces modèles, les systèmes sociotechniques (STS) font référence à une combinaison d'agents humains (partie « socio ») avec des agents techniques (partie « technique ») qui interagissent pour supporter l'activité selon une organisation (STANTON, SALMON, WALKER, SALAS, & HANCOCK, 2017). Dans ce contexte, la SA d'un STS est appréhendée d'une part, comme « *la construction active d'un modèle d'une situation partiellement partagé et partiellement distribué entre deux ou plusieurs agents, à partir duquel un agent peut anticiper les états futurs importants* » (ARTMAN & GARBIS, 1998, P.2). D'autre part, elle est également définie comme une propriété qui émerge dans les systèmes collaboratifs, qui résulte des interactions entre les agents en présence, aussi bien les

[8] (Version originale en anglais de la définition) The conscious dynamic reflection on the situation by an individual.

agents humains que les agents techniques (NEVILLE & SALMON, 2016 ; SALMON ET AL., 2008; SALMON, WALKER, & STANTON, 2016 ; STANTON ET AL., 2010, 2015).

Puisque le but de nos recherches est de proposer une interface qui soutienne la SA de l'agent humain, nous nous sommes focalisés sur les modèles centrés sur les individus. Parmi eux, trois modèles en particulier sont développés dans la littérature (DARSES, RIX-LIEVRE, & CHAUVIN, 2016) :

1. Le modèle cognitiviste d'ENDSLEY (1995) : Il présente une vision de la SA reposant sur les processus de traitement de l'information.
2. Le modèle fonctionnel de l'activité de réflexion et d'orientation de BEDNY ET MEISTER (1999) : Basé sur la théorie de l'activité de VYGOTSKY[9] (1962), ce modèle appréhende la SA comme un concept fortement lié aux concepts de but, d'image opérative, d'interprétation et de sens.
3. Le modèle écologique de SMITH ET HANCOCK (1995) : Il est basé sur la théorie de NEISSER (1976) du cycle perception-action qui s'appuie elle-même sur les travaux de GIBSON[10] (1979).

Dans cette section, nous allons nous focaliser sur le modèle cognitiviste D'ENDSLEY (1995) qui constituera, pour notre travail de recherche, le modèle-cadre de la SA du conducteur d'un véhicule autonome. Le modèle d'Endsley présente en effet l'avantage de pouvoir être directement associé aux modèles de la tâche de conduite et, notamment, à celui de MICHON (1985) comme l'ont montré MATTHEWS, BRYANT, WEBB ET HARBLUK (2001). Le modèle de MICHON (1985) subdivise la tâche de conduite en trois niveaux de contrôle :

- **Le niveau stratégique** : Selon MICHON (1985), c'est au niveau stratégique qu'est définie la planification générale du trajet. Il inclut les objectifs du voyage, les routes à suivre, ainsi qu'une évaluation des coûts et des risques induits. Les plans dérivent d'une considération générale du transport et de la mobilité mais aussi de la satisfaction et du confort du conducteur. À ce niveau, la pression temporelle est relativement faible.

- **Le niveau tactique** : Au niveau tactique, les conducteurs réalisent le choix des trajectoires et des manœuvres dans un cadre spatio-temporel limité ; il s'agit, par exemple, des dépassements ou des changements de voie (MICHON, 1985). C'est un niveau intermédiaire où les tâches impliquent des prises de décision concernant les actions qui vont être mises en œuvre dans les instants qui suivent. Comparativement au niveau stratégique, la pression temporelle est plus forte mais l'investissement cognitif moins élevé. Ainsi, l'évitement d'obstacles, l'acceptation d'une insertion, le dépassement, le changement de voie, la distance inter véhiculaire, etc. relèvent de ce niveau.

- **Le niveau opérationnel** : C'est à ce niveau que sont gérés les contrôles latéraux et longitudinaux (MICHON, 1985). Les tâches qu'on y retrouve sont les résultantes des niveaux supérieurs (stratégique et tactique). Elles sont réalisées par les conducteurs de manière quasi automatique. Par conséquent, le coût cognitif y est moindre, mais la

[9] La théorie de l'activité, issue de la psychologie russe, définit trois fondamentaux dans l'activité : les buts, les motivations qui orientent l'individu vers un but particulier et les méthodes d'activité.
[10] Dans la théorie de perception de Gibson, l'individu prend directement en compte les informations utiles qui sont des invariants de la situation, que Gibson (1979) appelle *affordances*.

pression temporelle y est très élevée. À ce niveau, on trouve les tâches de guidage, de contrôle de la trajectoire, de réaction aux obstacles ou d'exécution des manœuvres.

II.1 Modèle d'Endsley

Le modèle D'ENDSLEY (1995) est le modèle de la SA le plus cité dans la littérature avec plus de 2000 citations enregistrées dans la base de données Scopus. Comme nous l'avons déjà mentionné, ENDSLEY (1995, P 36) définit la SA comme « *la perception des éléments dans l'environnement dans un volume de temps et d'espace, la compréhension de ce qu'ils signifient et la projection de leur statut dans un futur proche* ». La Figure 13 présente le modèle de *la Situation Awareness* et, notamment, les facteurs qui l'influencent, ainsi que le lien qu'elle entretient avec la décision.

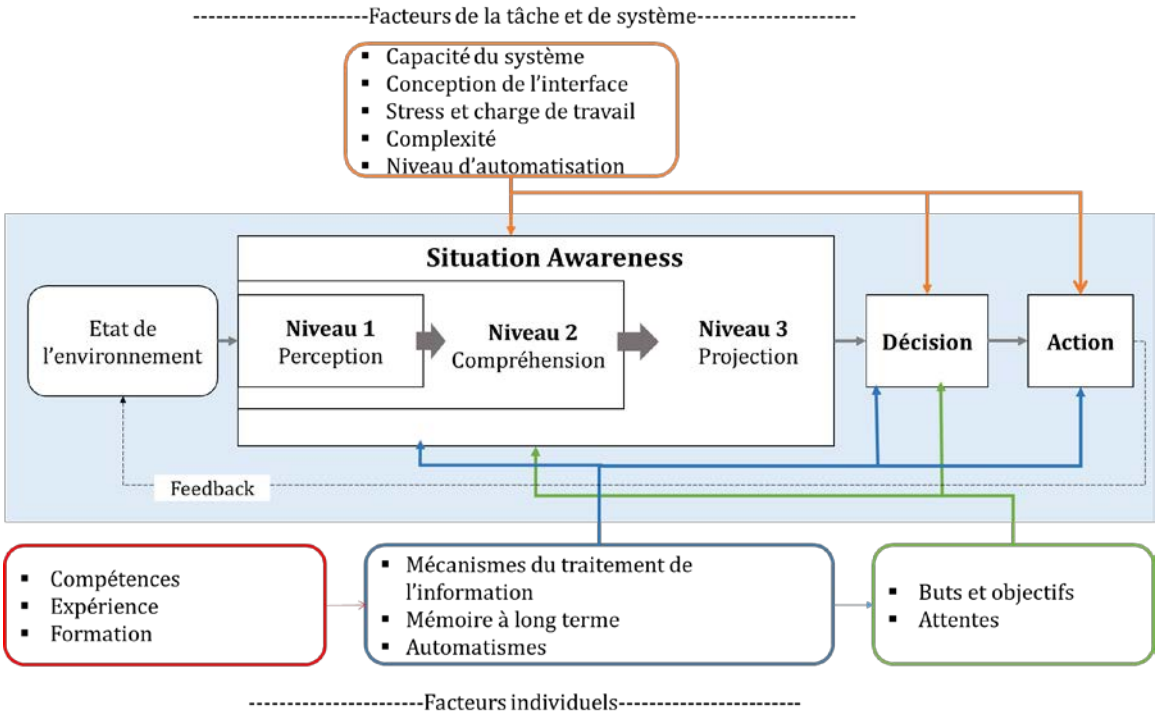


Figure 13 : Modèle de la Situation Awareness d'Endsley (traduit et adapté de Endsley, 1995)

La SA d'un individu, vue par ENDSLEY (1995), a donc trois niveaux :

- **Niveau 1 : La perception des éléments de l'environnement.** À ce niveau, il n'y a aucune interprétation de l'information. Il s'agit juste d'une réception des informations dans leur forme brute sans aucun traitement. Ce niveau contient des *informations sur les états, les attributs et la dynamique des éléments pertinents de l'environnement* (ENDSLEY, 1995).

- **Niveau 2 : La compréhension de la situation actuelle.** Ce niveau intervient après la perception, à partir du moment où les données peuvent être intégrées à des schémas[11] existants. Le traitement de l'information, qui sous-tend la compréhension, consiste à

[11] Les schémas sont des structures permanentes, stockées en mémoire à long terme, décrivant des situations prototypiques et/ou des séquences d'action et permettant de comprendre et d'agir (CHAUVIN, 2008, P.3).

mettre en correspondance les caractéristiques de la situation en cours avec des schémas contenus en mémoire et représentant des situations prototypiques. Cette étape de compréhension est importante pour saisir la signification des éléments perçus au niveau précédent, à travers une image organisée de la situation, en rapport avec les objectifs.

- **Niveau 3 : La projection des statuts futurs.** Ce niveau est associé à la capacité à anticiper, c'est-à-dire à projeter les états des éléments perçus et compris, dans un futur proche. L'exactitude de la prédiction est fortement corrélée à l'exactitude des deux niveaux précédents. C'est le niveau de pronostic des états futurs de la situation perçue.

Sept principales critiques ont été faites au modèle D'ENDSLEY (1995), critiques auxquelles Endsley répond dans un article publié en 2015. Nous nous arrêterons sur les quatre premières, qui sont les plus fréquentes. Le lecteur pourra se référer à l'article d'ENDSLEY (2015) pour prendre connaissance de l'ensemble du débat.

- **Critique 1** : Une critique récurrente porte sur le caractère linéaire des trois niveaux, qui suggère un ordre de précédence (niveau 1 nécessaire pour passer au niveau 2, niveau 2 nécessaire pour passer au niveau 3) (SORENSEN, STANTON & BANKS, 2011 ; SALMON, STANTON, & YOUNG, 2012 ; DEKKER & LUTZHOFT, 2004). ENDSLEY (2015) précise que les niveaux de la SA sont des niveaux croissants et non des niveaux linéaires. On peut dire ainsi, si l'on considère le rapport entre le niveau 1 de perception et le niveau 2 de compréhension, qu'un individu qui a perçu les informations pertinentes de l'environnement est plus à même de comprendre une situation donnée.

- **Critique 2 :** Une autre critique avance que le modèle d'Endsley présente la construction de la SA sous la forme d'un processus de traitement de l'information (CHIAPPE, STRYBEL, & VU, 2012 ; SALMON, STANTON, & YOUNG, 2012. S'il est vrai que le modèle incorpore dans sa structuration des processus de traitements de l'information, il va un cran au-dessus pour tenter de comprendre le comportement des humains dans la conduite de systèmes complexes (ENDSLEY, 1995). Il prend en effet en compte les objectifs de l'opérateur humain, qui dirigent sa recherche d'informations dans une situation donnée. ENDSLEY (2015) rappelle ainsi que son modèle met en évidence des liens forts entre les attentes d'un individu, ses buts et la direction de son attention, la perception des informations et leur interprétation.

- **Critique 3** : Elle est relative à la nature de la SA ; s'agit-il d'un produit ou d'un processus ? ENDSLEY (1995, P. 36) indique qu'il faut distinguer la SA en tant qu'état de connaissance, des processus utilisés pour atteindre cet état. Ces processus, qui peuvent varier considérablement d'un individu à l'autre et selon les contextes, constituent la *Situation Assessment* qui englobe un ensemble d'activités cognitives et physiques permettant de construire, de développer et de maintenir la SA. Ces propos sont à l'origine de la critique qui consiste à dire que le modèle restreint la SA au seul état de connaissance, indépendamment des processus qui l'induisent (KLEIN, MOON & HOFFMAN, 2006 KLEIN, PHILLIPS, RALL, & PELUSO, 2007.; SALMON ET AL., 2008 ; CHIAPPE ET AL., 2011). Cependant, ENDSLEY (1995) montre bien le lien existant entre les processus et le produit : d'une part, les processus conduisent à la SA, et d'autre part la SA en tant que produit influe sur les processus.

- **Critique 4** : Certains auteurs, tels que SALMON ET AL. (2008), ont qualifié le modèle d'Endsley de statique. Pourtant, ENDSLEY (1995, 2015) affirme que, du fait de la nature

dynamique des situations, la SA inclut les aspects dynamiques de l'environnement qu'il s'agisse du passé mais aussi du futur.

Ainsi, les critiques, bien que nombreuses, ne remettent en cause ni le fondement du modèle d'Endsley, ni son utilisabilité notamment dans le domaine de la conduite automobile. MATTHEWS ET AL. (2001) ont établi une correspondance entre les trois niveaux de contrôle de MICHON (1985) à savoir les niveaux stratégique, tactique et opérationnel, et le modèle d'Endsley :

- **Au niveau stratégique** : MATTHEWS ET AL. (2001) mettent l'accent sur l'importance du niveau 3 de la SA ; nécessaire lorsque l'agent humain s'assure d'atteindre sa destination finale. De plus, ils ajoutent que pour suivre un itinéraire, le conducteur a recours à des éléments du niveau 2 de la SA. Le niveau 1 de la SA a également une contribution puisqu'il constitue la base des niveaux 2 et 3.

- **Au niveau tactique** : MATTHEWS ET AL. (2001) précisent que les contributions des niveaux 1 et 2 de la SA sont importantes pour faciliter les manœuvres du véhicule dans l'environnement routier, détecter les signaux appropriés de l'environnement et comprendre la situation de conduite. Cependant, ils ajoutent que le niveau 3 est aussi pertinent dans les situations de conduite, puisqu'il faut anticiper des changements (changement de trajectoire d'un autre usager notamment).

- **Au niveau opérationnel** : MATTHEWS ET AL. (2001) précisent, qu'à ce niveau opérationnel, les conducteurs ont besoin des éléments du niveau 1 de la SA pour que les actions soient réalisées de façon appropriée. Par ailleurs, ils ajoutent que le niveau 2 de la SA peut être également impliqué si les processus liés à la conduite renvoient des messages relatifs à un fonctionnement défaillant de l'automate.

S'il est vrai que le modèle cognitiviste est très répandu dans le monde anglo-saxon, les travaux de l'ergonomie francophone ont permis d'introduire, bien avant ceux d'Endsley, une notion proche de celle de la SA : la notion de « représentation mentale occurrente » que nous explicitons dans le paragraphe suivant.

II.2 Représentations occurrentes et COSMODRIVE

RICHARD (1990) définit les représentations occurrentes comme des constructions circonstancielles faites dans un contexte particulier et à des fins spécifiques. Il s'agit « d'*un modèle intériorisé de la réalité, élaboré en mémoire à court terme* » (CHAUVIN, 2008, P.3). Ainsi, la représentation mentale - qui porte non seulement sur l'environnement, le système à contrôler, les ressources de l'agent humain mais également sur ses actions possibles (HOC & AMALBERTI, 1995) -se distingue de la SA qui porte sur l'environnement extérieur et n'intègre pas explicitement l'action ou l'intention d'action.

Les représentations mentales occurrentes font depuis quelques années l'objet de différents travaux de recherche au Laboratoire d'Ergonomie et des Sciences Cognitives pour les Transports (LESCOT) notamment grâce aux travaux de Bellet qui a proposé le modèle **COgnitive Simulation MOdel of the DRIVEr** (COSMODRIVE) (BELLET, 1998 ; TATTEGRAIN-VESTE, BELLET, PAUZIE, & CHAPON, 1996 ; BELLET, & TATTEGRAIN-VESTE, 2003 ; BELLET, BAILLY-ASUNI, MAYENOBE, & BANET, 2009; BELLET, MAYENOBE, BORNARD, PARIS, GRUYER, & CLAVERIE, 2011). COSMODRIVE est un modèle de simulation dynamique de l'activité cognitive et comportementale du conducteur (humain). En effet, les conducteurs, grâce à leur interaction avec l'environnement de conduite, construisent des représentations mentales des événements et des objets qui les entourent.

Celles-ci sont stockées dans la mémoire de travail grâce à un processus associant la connaissance opérative préexistante (OCHANINE, 1977) qui est modélisée dans COSMODRIVE par des schémas[12] de conduite (BELLET & TATTEGRAIN-VESTE, 1999) et les informations perçues dans l'environnement externe. Les représentations mentales sont ainsi mises à jour régulièrement au cours de la réalisation de l'activité de conduite (BELLET, MAYENOBE & BORNARD, 2010). Pour que cette mise à jour puisse se faire, une boucle de régulation « Perception-Cognition-Action » est établie entre l'agent humain et l'environnement de conduite. Ces représentations mentales, bien que déformées par rapport au réel (BELLET, BAILLY-ASUNI, BOY, BOVERIE & HOC, 2006), permettent au conducteur d'assurer les fonctions cognitives d'exploration, d'anticipation, de prise de décision et d'actions sur les commandes du véhicule. De façon générale, l'architecture de COSMODRIVE est composée de plusieurs modules fonctionnant en parallèle et communiquant entre eux, chacun simulant une partie des activités mentales d'un conducteur :

i) Le module stratégique,
ii) Le module opérationnel,
iii) Le module de perception,
iv) Le module d'exécution,
v) Le module de contrôle et de gestion,
vi) Le module de gestion des cas d'urgences.

Pour connaître le contenu de chacun de ces modules, nous invitons le lecteur à se référer à BELLET, BORNARD, MAYENOBE & SAINT PIERRE (2011). Quelques études ont cherché à évaluer la pertinence de COSMODRIVE. Par exemple, BORNARD, BELLET, MAYENOBE, GRUYER ET CLAVERIE (2011), grâce à leur étude portant sur 20 participants qui devaient suivre une voiture dans différentes situations de conduite, ont montré que le module de perception de COSMODRIVE était en mesure de reproduire certaines stratégies visuelles observées chez les participants. Par ailleurs, l'étude de BELLET ET AL (2012) basée sur une simulation réalisée avec COSMODRIVE, a permis de comprendre les processus cognitifs en jeu chez l'agent humain lorsqu'il est visuellement distrait. Ces auteurs ont montré en particulier qu'une perception incomplète ou incorrecte de certains indicateurs routiers, à cause d'une tâche secondaire, impacte directement la construction de la représentation mentale, ce qui affecte la prise de décision du conducteur et sa performance de conduite. Cette étude tend à confirmer celle de BELLET ET AL (2006) qui ont montré qu'une représentation erronée[13] conduit à un comportement de conduite inapproprié pouvant aboutir à un accident. VAN ELSLANDE (2001), lui aussi, a évoqué les représentations mentales incomplètes ou erronées comme causes de certains accidents.

Le modèle de la SA d'Endsley et COSMODRIVE, bien que différents, montrent que la perception, la compréhension et la projection de ce qui se passe dans un environnement sont essentielles pour un individu qui contrôle seul et entièrement un système. Par ailleurs, dans les systèmes automatisés, la notion de représentation occurrente permet d'avoir une vision plus élargie et vient compléter le modèle d'Endsley qui se focalise majoritairement sur l'environnement extérieur. Dans nos travaux, cette complémentarité est très utile, puisque l'agent humain doit avoir une représentation mentale non seulement de l'environnement routier mais aussi de

[12] Ils séparent l'environnement en deux zones : i) les zones de conduite où le conducteur fait circuler son véhicule pour atteindre sa destination et ii) les zones d'exploration perceptive où le conducteur peut sélectionner des informations visuelles pour remplir les conditions pour passer d'une zone de conduite à aune autre.

[13] Une représentation mentale est qualifiée d'erronée quand il y a par exemple, une erreur dans l'analyse de la situation ou une mauvaise anticipation des événements ou des effets d'une action.

l'automate qui le soutient ou se substitue à lui dans la réalisation de la tâche de conduite. Dans les lignes suivantes, nous présenterons les facteurs qui influencent la SA de l'agent humain en conduite manuelle, lesquels, nous le pensons, influencent également la SA en conduite autonome.

III. Facteurs qui influencent la *Situation Awareness* en conduite automobile : intérêt de la Réalité Augmentée

La littérature fait mention de deux états principaux de la SA. En effet, celle-ci peut être :

- **Suffisante** : Dans la littérature anglo-saxonne, on parle de « *sufficient Situation Awareness* » ou de « *good Situation Awareness* ». La SA est dite suffisante lorsqu'un agent humain perçoit et interprète correctement les informations de l'environnement dans lequel il se trouve. Ainsi, il peut réagir convenablement à tout évènement imprévu, pour limiter ou annuler tous les dommages que cet évènement aurait pu engendrer. C'est l'état souhaité de la SA. Par conséquent, une SA suffisante chez l'agent humain est l'un des défis majeurs auxquels souhaite répondre la « conception pour la SA » que ENDSLEY (2016) appelle *Design for Situation Awareness*. C'est également le défi que nous souhaitons relever dans nos travaux.

- **Insuffisante** : Quand la SA est insuffisante, les agents humains n'arrivent pas à construire une représentation exacte et complète de leur environnement, représentation pourtant nécessaire pour atteindre les objectifs qui leur sont assignés. Ceci peut donc avoir des conséquences sur les performances obtenues.

En conduite automobile (comme dans tout domaine complexe), l'agent humain doit faire plus que percevoir l'état de son environnement pour avoir une SA suffisante. En effet, il doit également, comprendre la signification des éléments perçus, au regard de ses buts (ENDSLEY, 2016). Il existe plusieurs facteurs qui peuvent influencer la SA en conduite automobile, tant au niveau 1, 2 et 3 de la SA. La Figure 14 présente les principaux facteurs que nous avons pu identifier. Les facteurs extérieurs au conducteur sont les facteurs environnementaux d'une part (MUTABAZI, RUSSELL, & STOKES, 1998 ; WATTS & QUIMBY, 1980 ; BIDULKA, SAYED, & HASSAN, 2002; SAAD, 2002 ; THEEUWES & GODTHELP, 1995),), les facteurs individuels (BOLSTAD, 2001 ; HOLLAND, 2001 ; UNDERWOOD, CHAPMAN, BOWDEN, & CRUNDALL, 2002 ; JACKSON, CHAPMAN & CRUNDALL, 2009) et l'IHM d'autre part (GEORGE, THOUVENIN, FREMONT & CHERFAOUI, 2012 ; PFANNMÜLLER ET AL., , 2015).

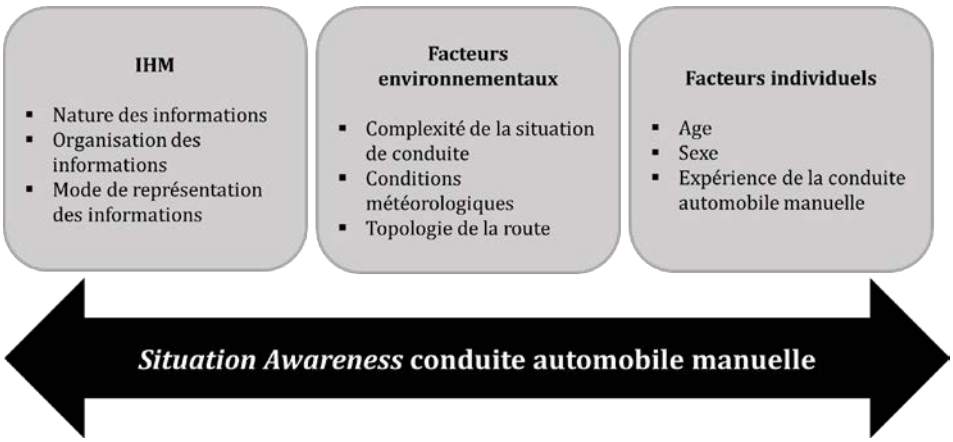


Figure 14: Les facteurs qui influencent la SA en conduite automobile manuelle

Nos travaux visant la conception d'une interface, nous présenterons d'abord l'incidence que ce facteur peut avoir sur le niveau 1 de la SA, puis nous aborderons l'impact de ce même facteur sur les niveaux 2 et 3.

III.1 Incidence de l'IHM sur la perception (niveau 1 de la SA)

JONES ET ENDSLEY (1996) ont montré que 76% des erreurs étaient liées à une perception incomplète ou incorrecte et concernaient donc le niveau 1 de la SA. Ainsi, chez les pilotes, elles sont souvent dues au fait que ceux-ci ne perçoivent pas l'information dont ils ont besoin (JONES & ENDSLEY, 1996). En effet, dans les travaux réalisés par JONES ET ENDSLEY (1996), bien que toutes les informations aient été présentées aux pilotes, ceux-ci n'ont pas pu détecter les informations les plus pertinentes, c'est-à-dire les plus appropriées à leur tâche. Il en ressort clairement qu'une interface qui ne met pas en évidence les informations pertinentes peut engendrer une SA insuffisante. C'est la raison pour laquelle ENDSLEY (2016) recommande de présenter les plus pertinentes d'entre elles, de sorte que les agents humains puissent rapidement les identifier, notamment dans un contexte où elles proviennent de plusieurs sources. L'environnement dans lequel s'effectue la tâche de pilotage d'avions civils présente des analogies à celui dans lequel s'effectue la tâche de conduite automobile avec dans ce dernier cas, plus d'usagers dans l'environnement à prendre en compte dans la prise de décision (AMALBERTI, 1996). Ainsi, la nécessité de mettre en évidence les informations pertinentes semble tout aussi importante en conduite automobile.

Par ailleurs, le nombre d'informations qu'une IHM communique à l'agent humain a également une incidence sur sa SA. En effet, en conduite automobile, HORREY ET WICKENS (2007), KLAUER, DINGUS, NEALE, SUDWEEKS ET RAMSEY (2006) et DINGUS ET AL., (2006) ont mis en évidence qu'une quantité trop importante d'informations communiquées à l'agent humain peut engendrer une surcharge visuelle et ainsi occasionner des accidents. La façon dont les informations sont présentées et organisées est donc capitale pour que l'agent humain puisse facilement faire le lien entre ces informations et les buts qu'il s'est fixé. Nous tâcherons de prendre en compte ce facteur dans la logique de conception de l'interface en structurant, dans les différents afficheurs, les informations selon les niveaux opérationnel, tactique et stratégique. Il est également important que ces informations soient saillantes pour être rapidement perçues.

Un moyen de présenter les informations pour qu'elles soient plus facilement perçues consiste à utiliser la réalité augmentée (RA). Ainsi, pour favoriser la perception qu'a un conducteur d'un piéton qui apparaît devant sa voiture, PHAN, THOUVENIN ET FREMONT (2016) a utilisé la réalité augmentée comme un moyen de déplacer le focus attentionnel du conducteur vers ce piéton afin de diminuer le risque de collision. PHAN ET AL. (2016) n'est pas le seul à avoir utilisé la RA pour favoriser la *Situation Awareness* de l'agent humain. En effet, KIM, ISLEIB ET GABBARD (2016) ont également mené des études pour alerter l'agent humain, grâce à la réalité augmentée, quand un piéton traverse la route. Ils ont développé deux représentations : les rectangles englobants associés à tous les piétons identifiés (Figure 15) et les ombres virtuelles associées uniquement aux piétons identifiés comme étant sur la trajectoire du véhicule (Figure 16). Leurs résultats ont montré une efficacité moins grande des rectangles au niveau 1 de la SA par rapport aux ombres. En effet, les commentaires des participants ont révélé que les ombres virtuelles diminuaient la charge mentale grâce à la temporisation de leur affichage et leur densité minimale, la densité renvoyant ici à la place occupée dans le champ visuel de l'agent humain. De plus, les participants ont mentionné que le mouvement de l'ombre attirait plus l'attention du conducteur, l'aidant ainsi à mieux percevoir le piéton.

Figure 15: Rectangles englobants de tous les piétons détectés (Kim et al., 2016)

Figure 16: Ombre virtuelle du piéton identifié comme étant sur le chemin du véhicule-sujet (Kim et al., 2016)

Si l'IHM a un impact sur le niveau 1 de la SA, elle a également un impact sur les niveaux 2 et 3.

III.2 Incidence de l'IHM sur les niveaux 2 et 3 de la SA

Comme nous l'avons mentionné dans la section II de ce chapitre, la perception des éléments de l'environnement de travail est importante mais pas suffisante. Il est important pour l'agent humain de comprendre les éléments perçus et de se représenter leurs états dans un futur proche, ce qui correspond aux niveaux 2 et 3 de la SA. Quelques études ont porté sur l'impact de l'IHM sur ces deux niveaux. C'est le cas notamment des travaux de PARK, YOON, LEE ET KIM (2015) qui ont permis de tester un système qui reconnaît les situations dangereuses correspondant au niveau 2 de la SA, grâce à une analyse du temps restant avant la collision (TTC[14]). Une alerte est adressée au conducteur en fonction du niveau de danger, au moyen d'annotations en RA sur un HUD. Quatre niveaux de dangerosité ont été définis en fonction de la valeur du TTC (Tableau 4). Ainsi, selon les différents niveaux de dangerosité, des annotations en RA ont été conçues pour signaler le véhicule situé devant l'égo-véhicule [15](EV).

Tableau 4 : Niveau de risque et annotations associées (Park et al., 2015)

Niveau	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Valeur du TTC	$0s \leq TTC < 1{,}08s$	$1{,}08s \leq TTC < 2{,}52s$	$2{,}52s \leq TTC < 5s$	$5s \leq TTC$
Annotation du véhicule devant le véhicule sujet				Rien

Les auteurs ont démontré que leur système permet d'améliorer la SA du conducteur. Ces résultats sont corroborés par ceux de GEORGE ET AL. (2012) qui ont réalisé une étude sur des véhicules intelligents. De plus, PARK ET AL. (2015) ont mis en évidence que la métaphore dite de

[14] Time To Collision.
[15] Véhicule d'étude

la girouette[16] permettait de rendre plus saillants les obstacles de l'environnement routier définis par niveau de danger.

PFANNMÜLLER ET AL. (2015), quant à eux, ont comparé deux concepts de représentation en Réalité Augmentée pour le guidage de l'agent humain dans son environnement de conduite : une suite de boomerangs[17] (Figure 17) et la flèche (Figure 18). Chacune de ces représentations ou annotations a quatre variations : coupé, non coupé, incliné et 2D. Grâce à un afficheur tête haute (appelé également HUD) situé derrière le volant dans un environnement de simulation, ces annotations ont directement été apposées sur la route dans la scène réelle.

Figure 17 : Concept "Suite de boomerangs" en variation « non coupé » (Pfannmüller et al., 2015)

Figure 18: Concept "flèche" en variation « non coupé » (Pfannmüller et al., 2015)

Des analyses ont montré que le concept « flèche » est significativement plus ambigu et plus difficile à interpréter que le concept « suite de boomerangs ». Une hypothèse énoncée par les auteurs, pour expliquer ces résultats, est que le concept « flèche » dans sa variation « non-coupée » en particulier, peut empêcher l'agent humain de percevoir d'autres objets de l'environnement (PFANNMÜLLER ET AL., 2015). Les auteurs ont néanmoins précisé que cette hypothèse devait être validée par des expérimentations futures. C'est la raison pour laquelle nous porterons une attention particulière au type de représentation graphique des informations à afficher.

Nous venons de montrer comment l'IHM peut influencer la SA d'un agent humain en conduite automobile classique (manuelle). Puisque notre objet de recherche porte sur des véhicules autonomes de niveau 4, nous allons aborder maintenant la question de la SA et de la représentation mentale de l'agent humain dans les véhicules fortement automatisés.

---

[16] Cette métaphore associe trois flèches à 4 couleurs. L'orientation de chaque flèche permet d'indiquer d'où vient le danger. Les couleurs permettent d'indiquer le degré de dangerosité par les couleurs rouge (très dangereux), orange (moyennement dangereux), jaune (peu dangereux) et vert (pas de danger).
[17] Il s'agit de la terminologie employée par les auteurs.

IV. La représentation mentale dans les voitures hautement automatisées

Comme nous l'avons vu dans le chapitre I, les voitures du niveau 4 de la taxonomie de la SAE, présentent la particularité de pouvoir fonctionner en mode autonome ou en mode manuel. Le passage du mode autonome au mode manuel s'effectue au cours d'une phase de reprise en main durant laquelle l'agent humain doit reconstruire rapidement une représentation correcte de l'environnement routier (GOLD ET AL., 2013 ; MERAT ET AL., 2014 ; LORENZ ET AL., 2014 ; BELDERBOS, 2015 ; RADLMAYR ET AL., 2014 ; VAN DEN BEUKEL & VAN DEN VOORT, 2013). Par ailleurs, les voitures fortement automatisées peuvent poser des problèmes de confusion de modes bien connus dans le domaine de l'aviation notamment. La confusion de modes est manifeste quand l'agent humain ne sait pas répondre à la question « Qui fait quoi ? ». En d'autres termes, il n'arrive pas à identifier qui, de lui ou de l'automate, est en charge de la tâche de conduite à un moment donné. Dans les paragraphes suivants, nous allons présenter quelques travaux qui ont abordé ces deux problématiques.

IV.1 Phase de reprise en main

Les études sur la reprise en main portent aussi bien sur la qualité de sa réalisation, que sur son délai de réalisation. Dans le cadre d'une expérimentation sur simulateur de conduite autonome, dans laquelle il était demandé aux participants de reprendre en main le véhicule et de réaliser une sortie de voie, SAID ET CHAUVIN (2017) distinguent deux catégories de participants :

1. Un groupe de participants réalise des actions "douces", notamment sur la pédale de frein et réalise des sorties de voie relativement tardives. Il est associé à l'expression d'une expérience utilisateur positive.
2. Un deuxième groupe se caractérise par des actions « brutales » et une sortie de voie rapide. Il est associé à l'expression d'une expérience utilisateur négative.

D'autres travaux mettent également en évidence des freinages brusques, des changements de voie soudains et un mauvais contrôle latéral lors de la reprise en main DESMOND, HANCOCK, & MONETTE, 1998 ; GOLD ET AL., 2013 ; GOLD, KÖRBER, LECHNER, & BENGLER, 2016). Il en ressort donc que l'interface devrait être conçue pour aider à la réalisation de manœuvres douces lors de la reprise en main.

En ce qui concerne la temps de reprise en main (durée entre la demande de reprise en main et la reprise en main), ERIKSSON ET STANTON (2017) rapportent qu'il est en moyenne de 2.47 +/- 1.42 s ; cependant MERAT ET AL. (2014) montre qu'il peut aller jusqu'à 15s. Pour limiter la durée de reprise en main, plusieurs auteurs ont mis l'emphase sur l'importance de maintenir l'agent humain dans la boucle de conduite avant la demande de reprise en main. Ainsi, en conduite autonome, MULDER, ABBINK ET BOER (2012) ont utilisé des retours d'informations haptiques dans les virages pour permettre à l'agent humain de reprendre le contrôle de la tâche de conduite dans des situations non anticipées. NAUJOKS, BEFELEIN, WIEDEMANN ET NEUKUM (2017), quant à eux, ont identifié quatre conditions nécessaires pour que la reprise en main intervienne rapidement :

1. Le conducteur doit garder l'aptitude cognitive à conduire en mode manuel durant la conduite autonome.
2. Il doit comprendre qu'il est nécessaire de reprendre en main la voiture une fois que la demande de reprise en main a été émise.

3. Il doit interrompre les tâches qui n'étaient pas relatives à la tâche de conduite.
4. Il doit se focaliser sur la tâche de conduite manuelle, après la reprise en main.

La condition 1 est particulièrement intéressante parce qu'elle indique que la qualité de la phase de transition dépend de l'état cognitif de l'agent humain avant la reprise en main. Nous allons nous focaliser sur ce point, car il renvoie à la notion de *Situation Awareness*. En mode manuel, l'agent humain est dans la boucle de contrôle ; c'est-à-dire qu'il est engagé dans chacun des trois processus de contrôle suivants :

1. La définition d'un but (état désiré),
2. L'implémentation des actions pour atteindre le but,
3. Le retour d'information qui permet de déterminer si la stratégie a permis d'atteindre le but (STANTON & MARSDEN, 1996).

En réalité il y a plusieurs boucles de contrôle qui interviennent dans la tâche de conduite. Celles-ci sont représentées dans la
Figure 19 :

- **La boucle 1** : Elle s'établit entre la route et le véhicule.
- **La boucle 2** : Elle s'établit entre le véhicule et les systèmes qui le constituent.
- **La boucle 3** : Elle s'établit entre les systèmes du véhicule et l'agent humain.
- **La boucle 4** : Elle s'établit entre l'agent humain et le véhicule.
- **La boucle 5** : Elle s'établit entre l'environnement routier et le véhicule.
- **La boucle 6** : Elle s'établit entre l'agent humain et la route.

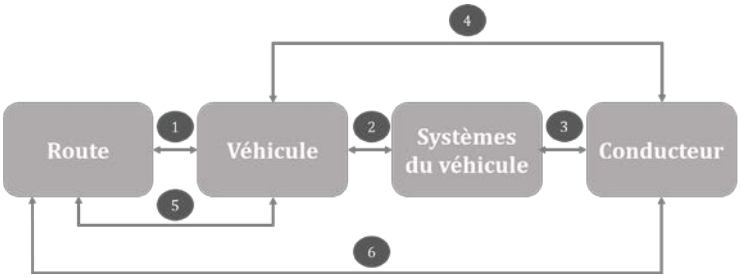


Figure 19 : L'agent humain et les boucles de contrôle (Banks et al, 2014)

On dit de l'agent humain qu'il est hors de la boucle de contrôle ou *out-of-the loop*, (WICKENS, 1994), s'il est désengagé des processus de contrôle cognitifs nécessaires dans les deux boucles 4 et/ou 6. Quand l'agent humain est hors de celles-ci, il ne peut pas mettre en œuvre des mesures correctives quand l'automate est défaillant (WICKENS & HOLLANDS, 1999). Lorsque cet état perdure, il en résulte une dégradation de la SA de l'agent humain à court terme et une dégradation de ses compétences à long terme (ENDSLEY & KIRIS, 1995 ; ROSE, 1979). Tant que l'automate fonctionne correctement, la dégradation des compétences n'est pas critique. Cependant, si une intervention manuelle urgente est requise à cause d'une situation que l'automate ne peut gérer, les compétences deviennent capitales pour maintenir le système à contrôler dans un état de fonctionnement sûr. Tout le défi de la voiture autonome est donc de maintenir les conducteurs à un certain niveau « dans la boucle », pour qu'ils puissent comprendre l'état du système et reprendre la main convenablement lorsque cela s'avère nécessaire. Nos travaux de recherche, en cherchant à améliorer la compréhension du comportement de l'automate par le conducteur, proposent de contribuer à relever ce défi.

Différentes recherches (CARMODY & GLUCKMAN, 1993 ; ENDSLEY & KIRIS, 1995) ont montré que lorsque l'agent humain est hors de la boucle de contrôle, des dégradations apparaissent au niveau 2 de la SA. ENDSLEY ET KIRIS (1995) ont réalisé une étude dans laquelle ils demandaient

aux participants de réagir à des défaillances de l'automate dans une tâche de navigation simulée avec un système d'assistance expert. Ils ont démontré que les participants qui étaient dans des conditions de totale automatisation et de semi-autonomie avant les défaillances de l'automatisme, avaient une compréhension de l'état du système significativement plus dégradée que lorsqu'ils réalisaient manuellement la tâche de navigation. KABER ET ENDSLEY (1999) ont également démontré qu'il y avait des pertes importantes de SA au niveau 2 lors de la surveillance des systèmes hautement automatisés. Le phénomène *out-of-the loop* provoque une diminution des temps de réaction de l'agent humain (MERAT & JAMION, 2009).

Dans les voitures fortement automatisées, RADLMAYR ET AL. (2014) ont mentionné que le phénomène *out-of-the loop* conduit à une détérioration de la *Situation Awareness* de l'agent humain parce qu'il dirige son attention vers des tâches secondaires au détriment de l'environnement de conduite. La *Situation Awareness* devient alors insuffisante, affectant ainsi la qualité de la reprise en main de la voiture. Ces propos sont corroborés par ZEEB ET AL. (2015). Une SA insuffisante dans les voitures fortement automatisées, causée par le phénomène *out-of-the loop*, peut également générer un problème de confusion de modes, sur laquelle nous portons une attention particulière dans le paragraphe suivant.

IV.2 Problème de confusion des modes

On parle de « confusion de modes » lorsque l'agent humain n'est pas en mesure de comprendre l'état ou le mode dans lequel se trouve l'automate. Les premiers travaux sur la confusion des modes ont été menés dans le domaine de l'aviation (SARTER, WOODS & BILLINGS, 1997 ; LÜTTGEN & CARRENO, 1999 ; BREDEREKE & LANKENAU, 2002 ; JOSHI, MILLER & HEIMDAHL, 2003 ; SCHUTTE, GOODRICH & WILLIAMS, 2017). En effet, dans ce domaine, plusieurs accidents ont déjà été causés par ce problème (BUTLER, MILLER, POTTS & CARRENO, 1998). La confusion de modes provient en partie du fait que certaines interfaces Homme-Machine ne fournissent pas les retours d'informations suffisants sur le statut du système automatique (NORMAN, 1990 ; JAMIESON & VICENTE, 2005). Par ailleurs, il arrive aussi que les agents humains ne comprennent pas complètement le principe de fonctionnement de l'automate. La confusion de modes peut également être due à la façon dont les informations sont communiquées à l'agent humain, laquelle affecte leur compréhension (SARTER & WOODS, 1994, 1995, 1997 ; VAN DEN BEUKEL & VAN DER VOORT, 2014). Dans la conduite automobile, plusieurs études ont été menées sur la confusion de modes concernant l'ACC (LEE, AHN & YANG, 2014 ; FURUKAWA, INAGAKI, SHIRAISHI & WATANABE, 2003). Si la confusion de modes est due à des représentations mentales incorrectes (DEGANI & HEYMANN, 2002 ; HEYMANN & DEGANI, 2007), elle peut être également causée par la complexité (une automatisation inutilement complexe) ou l'opacité (un affichage pauvre du statut fonctionnel de l'automatisme par exemple).

Qu'il s'agisse de faciliter la reprise en main de la voiture autonome ou d'éviter la confusion des modes, une attention doit être portée sur la conception des interfaces et la prise en compte de la SA dans celle-ci.

IV.3 Conception des interfaces dans les voitures autonomes

Les difficultés que les agents humains rencontrent dans les voitures fortement automatisées sont liées au fait qu'ils n'ont pas une parfaite compréhension de la situation courante et ne peuvent donc intervenir de manière adéquate. Dans un système fortement automatisé, l'interface Humain-Machine peut cependant faciliter la construction de la SA. ENDSLEY (1995) a proposé un ensemble de principes de conception d'une interface visant à atteindre cet objectif :

- **Principe 1** : Réduire les calculs que doivent faire les agents humains.

- **Principe 2** : Présenter les informations sous une forme qui rend la compréhension (niveau 2 de la SA) et la projection (niveau 3) aisées.
- **Principe 3** : Organiser les informations de sorte qu'elles soient cohérentes avec les objectifs de l'agent humain.
- **Principe 4** : Indiquer des éléments relatifs au mode en cours ou au statut du système.
- **Principe 5** : Émettre des signaux pour attirer l'attention de l'agent humain vers les éléments critiques durant des incidents ou des accidents.
- **Principe 6** : Fournir à l'agent humain une vue d'ensemble de la situation en lien avec ses objectifs.
- **Principe 7** : Générer et présenter des éléments de projection des évènements futurs pour favoriser le niveau 3 de la SA.
- **Principe 8** : Privilégier une interface multimodale pour aider au traitement parallèle de l'information.

Dans la même optique, CRANOR (2008), ainsi qu'ERIKSSON ET STANTON (2016), ont proposé que les agents humains aient des retours d'information appropriés pour qu'ils puissent entrer de nouveau dans la boucle de contrôle rapidement et en toute sécurité. RASMUSSEN ET VICENTE (1987) ont proposé quant à eux une démarche de conception d'interfaces dites « écologiques » visant à aider un opérateur à faire face à des situations inattendues.

a) Les interfaces écologiques

Une conception d'interface écologique encore appelée *Ecological Interface Design* (EID), a pour but de faciliter la compréhension du fonctionnement des systèmes à superviser, comme nous le mentionnions précédemment. Le mot « écologique » a été introduit par les travaux de GIBSON (1986) sur les interactions de l'agent humain avec son environnement. Pour GIBSON (1979), *« percevoir son environnement, c'est déjà le comprendre »*. Ainsi l'écologie, dans ce contexte, renvoie à l'environnement dans lequel s'effectue une tâche. Dans l'approche écologique, RASMUSSEN ET VICENTE (1987) cherchent à développer une interface qui permette à l'agent humain de faire face à des situations complexes. Cette conception repose sur deux outils principaux :

- La hiérarchie d'abstraction de RASMUSSEN (1986) ;
- Le modèle *Skills-Rules-Knowledge* (Habiletés-Règles-Connaissances) ou modèle SRK de RASMUSSEN (1983).

La hiérarchie d'abstraction permet de représenter un domaine de travail en termes de fins (objectifs et buts) et moyens selon une hiérarchie d'implémentation. Cet outil conduit à décrire un domaine de travail en cinq niveaux. Les niveaux les plus élevés comprennent des informations relatives aux fonctions et aux objectifs que les objets des systèmes doivent satisfaire et atteindre. Les niveaux inférieurs, quant à eux, contiennent des informations physiques, c'est-à-dire des informations relatives aux objets présents dans un domaine de travail et à leur fonctionnement. L'analyse du domaine de travail à l'aide de la Hiérarchie d'Abstraction met, en effet, en évidence les contraintes et les relations complexes qui caractérisent le domaine de travail. Ce sont ces contraintes, ainsi que les possibilités d'action des opérateurs à l'intérieur de l'enveloppe des contraintes, qu'une interface écologique rendra visible. VICENTE ET RASMUSSEN (1992) expliquent que l'analyse du domaine de travail fournit une base solide pour aider les opérateurs à s'adapter à des situations nouvelles (VICENTE, 2002). C'est la raison pour laquelle la conception des interfaces écologiques commence par cette analyse.

En ce qui concerne le modèle SRK de RASMUSSEN (1983), il présente les trois manières selon lesquelles les agents humains peuvent interagir avec leur environnement (figure 21).

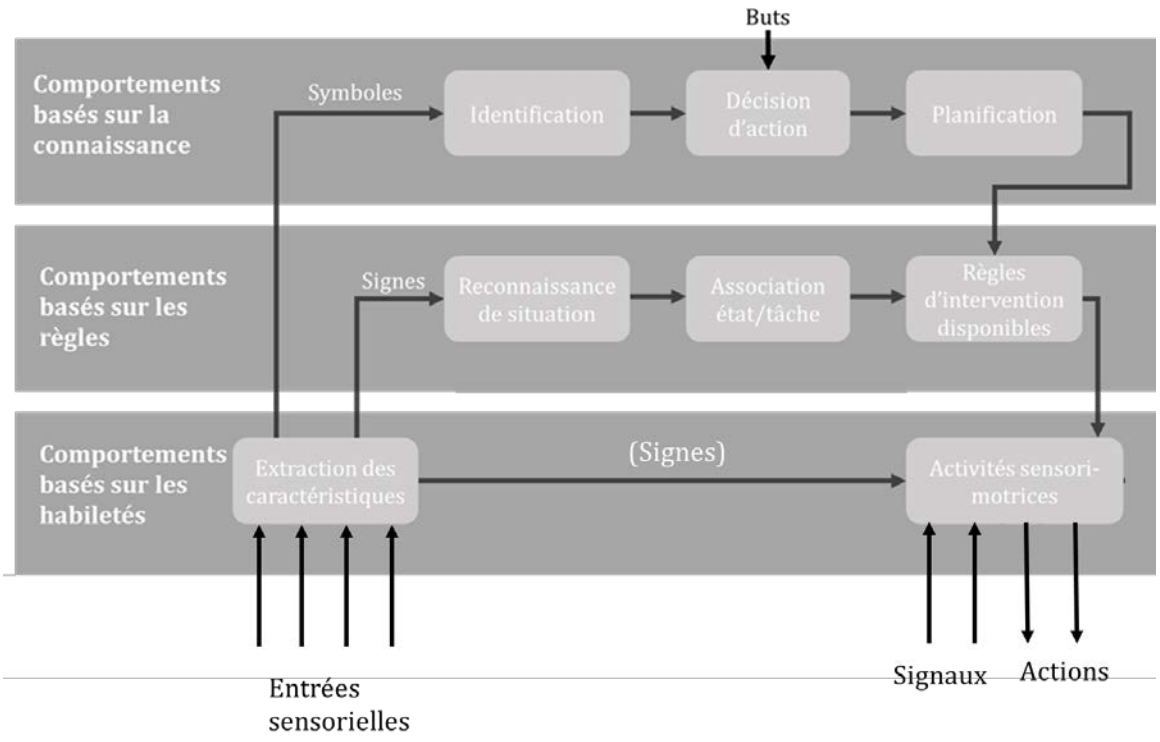


Figure 20 : Modèle Skills-Rules-Knowledge (traduit de Rasmussen (1983))

Ces niveaux comprennent :

- **Le niveau basé sur les habiletés (*skill-based behavior*)** : À ce niveau, aucun effort attentionnel n'est requis. Il s'agit des automatismes qui conduisent à des comportements sensori-moteurs orientés vers un but précis. Au niveau des habiletés, en conduite automobile, nous pouvons citer par exemple, le fait de tourner le volant ou d'appuyer sur les pédales de frein. Ces deux actions, qui relèvent du niveau opérationnel, consistent en la mise en œuvre d'automatismes.

- **Le niveau basé sur les règles (*rule-based behavior*)** : La limite entre ce niveau et celui des comportements basés sur les habiletés n'est pas rigide (RASMUSSEN, 1983). Toutefois, les comportements basés sur les règles peuvent être verbalisés contrairement à ceux basés sur les habiletés. Le niveau basé sur les règles est défini par une correspondance de type « si-alors », opérée entre des signes et une action appropriée (si « tel signe », alors « exécution de telle action »). Un signe est une unité à double face : expression (ou forme) et contenu. Ce ne sont pas les expressions immédiatement perceptibles qui déclenchent les règles, mais les contenus qu'elles codent (HOC, 1996). Aucune interprétation profonde n'est nécessaire mais les agents humains sont conscients de leurs activités cognitives et peuvent donc les verbaliser. À ce niveau, la génération de patterns de mouvements dépend de l'accès à des règles stockées et de l'expérience passée. La planification n'est pas synchrone avec l'action ; elle intervient en préalable. En conduite automobile, le comportement de l'agent humain face à une décision de changement de voie - qui prend en compte le niveau de proximité des véhicules environnants, leurs vitesses relatives, la topologie de la route, les conditions environnementales - relève de ce niveau.

- **Le niveau basé sur les connaissances (*knowledge-based behavior*)** : Pour des situations nouvelles, les connaissances de l'agent humain sont convoquées pour traiter le

problème actuel. Après une analyse de l'environnement, l'agent humain combine les règles de façon adéquate afin qu'elles lui permettent d'atteindre le but qu'il s'est fixé. La charge mentale dans ce contexte est typiquement plus élevée. En conduite automobile, un comportement qui relève de ce niveau est celui qui est adopté par l'agent humain lorsqu'un itinéraire initialement prévu est perturbé pour quelque raison que ce soit (accident, route devenue inexistante et le GPS ne l'a pas intégré parce qu'il n'est pas mis à jour, etc.). Le conducteur doit alors trouver un itinéraire alternatif pour atteindre son point d'arrivée. Sa connaissance du réseau routier est alors une aide importante.

Ainsi, une interface écologique doit s'adapter aux tâches cognitives de l'agent humain pour que les informations qu'il perçoit l'aident à solliciter le niveau basé sur les habiletés, correspondant à des activités quasi-réflexes et celui fondé sur les règles (VICENTE, 2002). Comme le précise VICENTE (2002), l'EID se focalise sur ces deux niveaux parce que le niveau basé sur les connaissances est plus sujet à des erreurs et demande plus d'effort de l'agent humain.

Quelques travaux dans le domaine de la conduite automobile ont utilisé l'approche écologique notamment ceux de LEE, HOFFMAN, STONER, SEPPELT ET BROWN (2006) ou ceux de KIM ET AL (2016). Pour éviter à l'agent humain d'avoir à réaliser des calculs après présentation d'une information (ce qui limite le coût cognitif), une interface écologique peut s'appuyer sur des technologies de visualisation moderne notamment la réalité augmentée, évoquée précédemment. C'est le cas par exemple des travaux de KIM ET AL (2016) portant sur les ombres virtuelles relatives à la dynamique des piétons, par le moyen d'un afficheur tête haute (*Head Up Display* ou HUD) que nous avons présentés précédemment.

b) La Réalité Augmentée

La RA est un système qui a les caractéristiques suivantes : i) Il combine des objets réels et des objets virtuels dans un environnement réel ; ii) Il fait coïncider les objets virtuels avec les objets réels ; iii) Il fonctionne de façon interactive, en 3D et en temps réel (AZUMA, 1997). Cette définition fait ressortir trois aspects comme le précisent VAN KREVELEN ET POELMAN (2007) :

- **Aspect 1** : Tout d'abord, la Réalité Augmentée n'est pas restreinte à un dispositif technologique spécifique tel que le casque de SUTHERLAND (1968).

- **Aspect 2** : La RA n'est pas limitée à une modalité visuelle. Il peut y avoir autant de modalités de réalité augmentée que de sens : visuelle, haptique, olfactive et auditive. Dans le cadre de cette thèse, nous ne nous focaliserons que sur la modalité visuelle. C'est la raison pour laquelle les sections suivantes n'aborderont que les éléments conceptuels et techniques relatifs à la Réalité Augmentée Visuelle.

- **Aspect 3** : Cette définition permet de dire que des approches telles que la Réalité diminuée (Figure 21) qui consistent à « enlever » des objets réels par ajout d'éléments virtuels, font partie de la Réalité Augmentée.

Figure 21 : Illustration de la Réalité diminuée. Figure gauche : stylo occultant partiellement la carte. Figure droite : Scène sans stylo (Zokai, Esteve, Genc,, & Navab, 2003)

Sa plus-value dans les voitures manuelles ou faiblement automatisée a déjà été montrée dans la section III de ce chapitre. Dans les voitures hautement automatisées, quelques travaux ont évalué le bénéfice de la RA dans la perception que l'agent humain a de la situation (niveau 1 de la SA). Par exemple, LORENZ, KERSCHBAUM ET SCHUMANN (2014) ont testé auprès de 46 employés de BMW deux représentations en RA qu'ils ont comparées :

- **La trajectoire « verte »** qui représente une trajectoire qui peut être prise en toute sécurité.
- **La trajectoire « rouge »** qui représente une trajectoire dangereuse.

Les résultats n'ont pas montré de différences significatives entre les deux représentations en termes de temps de reprise en main, mais les temps de réaction aux incidents étaient moindres avec la trajectoire « verte ». Les auteurs expliquent cela par le fait que les participants se sentaient plus en confiance avec la trajectoire verte qu'avec celle qui était rouge, évoquant plus le danger.

Si la RA apparaît prometteuse, une question importante concerne la manière de la produire. En effet, il y a trois approches pour présenter visuellement une information en RA : *Video see-through*, *Optical see-through* et projection. Chacune de ces approches est présentée de manière détaillée par VAN KREVELEN ET POELMAN (2010). L'aspect technologique explicité de la RA sortant du cadre de nos travaux, nous présenterons dans les lignes qui suivent les éléments principaux de ces approches pour justifier le choix de notre dispositif de RA pour le projet. Ces points ont été tirés de VAN KREVELEN ET POELMAN (2010) :

- **Approche 1 : *Video see-through*.** Elle consiste à ajouter des éléments de RA sur un environnement qui a été préalablement numérisé. C'est l'approche la moins onéreuse et la plus facile à implémenter. Par ailleurs, puisque l'environnement est numérisé, elle offre également l'avantage de pouvoir manipuler aisément les objets qui s'y trouvent. Parmi les principaux inconvénients de cette approche, on peut évoquer la faible résolution de la réalité, un champ de vision limité (qui peut cependant être augmenté) et le phénomène de parallaxe dû au fait que le positionnement de la caméra - à une certaine distance de la position réelle des yeux de l'agent humain - engendre un effort d'ajustement de l'agent humain (BIOCCA & ROLLAND, 1998). Des travaux menés par le MR Lab ont été effectués pour tenter de résoudre le problème de parallaxe (TANG, OWEN, BIOCCA & MOU, 2003). De plus, un autre problème est celui de la distance focale qui est fixe dans la plupart des dispositifs qui utilisent cette approche, conduisant à une faible accommodation.

- **Approche 2 : *Optical see-through*.** Elle consiste à ajouter les annotations de RA sur des objets de l'environnement qui n'ont pas été modifiés, au moyen de lames transparentes

ou de lentilles. Les dispositifs qui utilisent cette approche ne modifient pas la résolution de l'environnement réel. De plus, ils ne sont pas très onéreux et ne produisent pas d'effet de parallaxe. Cependant, ils reposent sur l'utilisation de caméras pour l'interaction et la mise en coïncidence des annotations avec la réalité. Par ailleurs, produire des objets de façon holographique par des lames transparentes et des lentilles, conduit à des inconvénients tels qu'une diminution de la luminosité et du contraste des annotations et de l'environnement réel. Cependant, quelques auteurs ont travaillé à la résolution de ces problèmes notamment celui de la luminosité qui a été traité par SCHOWENGERDT, SEIBEL, KELLY, SILVERMAN ET FURNESS (2003).

- **Approche 3 : Projection**. Elle consiste à projeter les annotations de RA sur des objets réels. Les systèmes qui utilisent cette approche n'ont pas besoin de dispositif supplémentaire pour la focalisation et ils peuvent couvrir de larges surfaces pour un plus grand champ de vision. Cette approche ne peut être utilisée qu'en intérieur à cause de la faible luminosité et du mauvais contraste des images projetées.

Si chacune de ces approches a ses avantages et ses inconvénients, nous ne pouvons utiliser l'approche 3. En effet, elle ne peut être déployée que dans des environnements préparés, c'est-à-dire des milieux intérieurs clos (VAN KREVELEN & POELMAN, 2007) qui s'opposent à l'environnement extérieur dans lequel se fait la tâche de conduite. Dans leurs travaux, LORENZ ET AL. (2014) ont utilisé l'approche *optical See-through*, qui est l'approche la plus utilisée en conduite automobile. PFANNMÜLLER ET AL. (2015) l'ont également utilisé. C'est également cette approche que nous nous nous proposons d'utiliser dans nos travaux. Une fois effectué le choix de l'approche RA qui sera déployée, il reste à déterminer le positionnement du dispositif.

Il est possible de définir trois catégories de dispositifs de RA en fonction de leur positionnement :

- **Les dispositifs portés sur la tête.** Les dispositifs les plus répandus de cette catégorie sont les lunettes de RA. Cependant, pour des personnes portant des lunettes de vue, il peut être gênant de superposer une deuxième paire.

- **Les dispositifs tenus à la main**. Dans cette catégorie, les téléphones portables sont les plus utilisés pour l'aide à la navigation (ZHOU, DUH & BILLINGHURST, 2008). Ces dispositifs présentent l'inconvénient de ne favoriser qu'une faible immersion de l'agent humain.

- **Les dispositifs fixes.** Parmi ces dispositifs on trouve, notamment dans le domaine de l'aéronautique et de la conduite automobile, l'afficheur tête haute (*Head Up Display* ou *HUD*).

Pour éviter un phénomène de distraction visuelle lors de la reprise en main (généré par les dispositifs tenus à la main) et éviter une gêne physique de contact à cause des dispositifs portés, nous avons opté pour un dispositif de RA fixe. Notre choix s'est porté en particulier sur le HUD qui s'est imposé comme le dispositif de Réalité Augmentée des véhicules de dernière génération. Plusieurs équipements automobiles y ont déjà eu recours comme Continental (CONTINENTAL) et Mercedes (CARADVICE). De plus, Renault a déjà mis en vente plusieurs modèles de voitures d'ores et déjà dotés de HUD, parmi lesquels la Renault Mégane GT 2016 dans laquelle le HUD est placé au-dessus du volant (Figure 22, emplacement C). Cet emplacement est en effet propice à la projection d'informations nécessaires à la bonne réalisation de la tâche de conduite (GUO, ZHAO, WANG & JIANG, 2014). Par ailleurs, il est préféré par les agents humains aux autres emplacements A, B et D comme le précisent GUO ET AL. (2014).

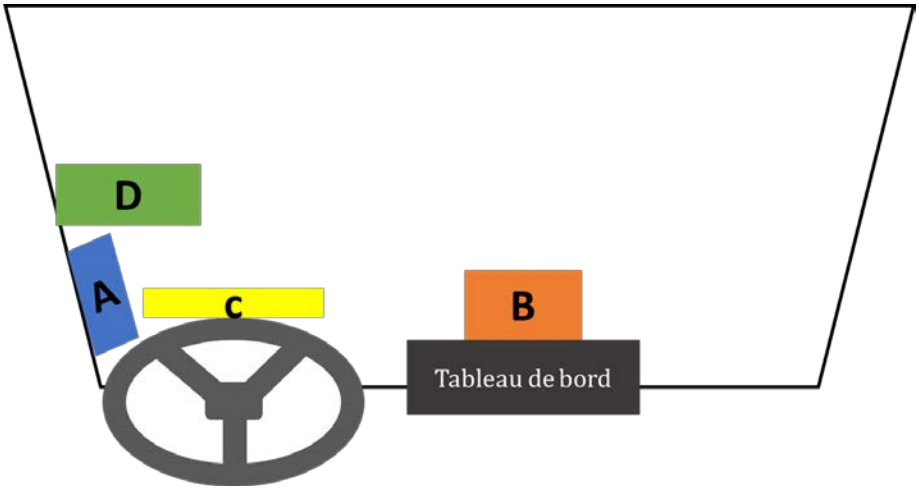


Figure 22 : Les emplacements possibles pour le HUD (adapté de Guo et al., 2014)

Lors de l'expérimentation qui sera réalisée, nous utiliserons également cet emplacement du HUD, derrière le volant.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié trois catégories de modèles de la *Situation Awareness* : les modèles qui traitent de la SA d'un individu, les modèles qui traitent de la SA d'une équipe et les modèles qui traitent de la SA des systèmes sociotechniques. Nous nous sommes focalisés sur les modèles centrés sur les individus en faisant référence au modèle D'ENDSLEY (1995) et à la notion de représentation occurrente qui est plus large que la notion de SA.

Ce chapitre a montré qu'une conception d'interface pour les voitures hautement automatisées doit prendre en compte le développement et le maintien d'une SA suffisante de l'agent humain en mode autonome. En effet, comme nous l'avons mentionné dans les lignes précédentes, l'agent humain doit percevoir les éléments de l'environnement de conduite, les comprendre et se représenter leurs états futurs pour pouvoir réaliser une reprise en main de la conduite automobile de bonne qualité. Par conséquent, une des exigences que nous chercherons à respecter dans nos travaux de conception est le maintien d'une SA suffisante de l'agent humain avant la reprise en main. Pour ce faire, nous utiliserons la Réalité Augmentée, qui a déjà été utilisée aussi bien dans la conduite manuelle qu'en conduite autonome.

À côté d'une représentation suffisante de l'environnement de conduite, une bonne compréhension du fonctionnement de l'automate est également nécessaire. Pour éviter toute difficulté de compréhension (et notamment les confusions de mode), une solution consiste à rendre « transparent » le fonctionnement de l'automate par le biais de l'interface. Le chapitre suivant précisera les enjeux liés au concept de transparence.

Chapitre III. **Conception d'une IHM basée sur la transparence**

I. Introduction

Dans le chapitre I, nous avons présenté l'automatisation telle qu'elle est appréhendée dans le domaine de la conduite automobile avec, notamment, les différentes taxonomies qui la subdivisent en plusieurs niveaux. Les voitures fortement automatisées, c'est-à-dire celles de niveau 4 et de niveau supérieur selon la taxonomie de la SAE, présentent de nombreux avantages parmi lesquels la réduction des accidents routiers (CHOI & JI, 2015). Si le projet est prometteur, l'une des barrières qu'il faut définitivement franchir est celle de leur acceptation par le public auquel elles sont destinées comme l'ont évoqué WEI, SNIDER, KIM, DOLAN, RAJKUMAR ET LITKOUHI (2013).

La décision d'utiliser un automatisme est fortement corrélée à la confiance qu'a le conducteur envers la machine. Plusieurs auteurs l'ont explicitement mentionné. MUIR (1994), par exemple, a indiqué que le choix qu'un agent humain fait entre un contrôle manuel et un contrôle automatisé dépend de ce niveau de confiance. MUIR (1987) a d'ailleurs spécifié que si un agent humain ne fait pas confiance à l'automatisation, il aura tendance à réaliser une tâche lui-même. Par conséquent, il nous semble important de définir la notion de confiance de façon générale d'une part, et de mettre l'accent sur la notion de confiance dans le cadre de l'automatisation d'autre part. Ceci nous permettra de définir les facteurs susceptibles de faciliter, ou au contraire de freiner l'acceptation des voitures fortement automatisées.

Nos travaux de recherche portant sur la conception d'une interface dans une voiture hautement automatisée, nous allons nous demander en quoi les IHM peuvent influencer la construction de la confiance. Cette question n'est pas récente et quelques auteurs, tels que BELLER, HEESON ET VOLLRATH (2013), l'ont déjà abordée. Dans la littérature, une notion apparaît fortement liée à celle de confiance ; il s'agit de la notion de « transparence ». Selon LYONS (2013), concevoir des interfaces « transparentes » permettrait d'augmenter la confiance des utilisateurs envers un système fortement automatisé ; cet auteur propose un modèle de transparence que nous reprendrons dans nos travaux. La notion de transparence est, elle-même, liée à la notion de communication entre l'humain et la machine. Penser la transparence suppose de définir les informations que le système doit communiquer à l'humain qui le supervise. C'est la raison pour laquelle la dernière section de ce chapitre présentera la démarche de définition des informations que nous avons utilisée dans le cadre de nos travaux de recherche. Nous avons en effet suivi les principes de la *Cognitive Work Analysis* (CWA) qui est utilisée dans le cadre de la conception d'interfaces écologiques Cette transparence repose donc sur deux modèles dont la plus-value a été présentée au chapitre II.

Ce chapitre sera donc divisé en trois sections principales. Dans la section II, nous définirons ce qu'est la confiance. Nous nous arrêterons, notamment, sur la place de la confiance dans les voitures hautement automatisées et les facteurs qui l'influencent. Nous présenterons ensuite deux modèles de « transparence » et porterons une attention particulière au modèle de Lyons. La section IV sera dédiée à la présentation de la démarche *Cognitive Work Analysis*. Nous présenterons plus en détail les étapes de la démarche qui nous ont permis d'identifier les informations à communiquer au conducteur.

II. La confiance

La confiance a été étudiée dans plusieurs disciplines, telles que la psychologie sociale, l'ergonomie cognitive et la psychologie des organisations (LEE & SEE, 2004 ; LEE & MORAY, 1992 ; SANDERS, OLESON, BILLINGS, CHEN & HANCOCK, 2011). Les contextes différents dans lesquels la confiance a été étudiée ont conduit à plusieurs définitions et théories.

Dans la littérature, la confiance est considérée de différentes manières. En effet, certains auteurs l'appréhendent comme une intention (JOHNS, 1996 ; MAYER, DAVIS & SCHOORMAN, 1995).. D'autres la définissent comme une attitude (ROTTER, 1967 ; BARBER, 1983). D'autres encore l'appréhendent comme un comportement (DEUTSCH, 1960). Ainsi, il n'existe pas de définition universelle.

Puisque nos travaux se situent à la croisée des chemins entre la psychologie et l'automatique humaine, nous allons examiner plus en détail la définition que donne la psychologie sociale de la confiance. En psychologie sociale, dans le cadre d'interactions entre agents humains, la confiance est définie comme une notion qui se construit, impliquant en particulier la prédictibilité du comportement d'une personne par une autre (DEUTSCH, 1958). Il a été démontré que lorsqu'un agent humain (agent A) a une grande confiance dans un autre agent (agent B), l'agent A suppose que l'agent B va faire ce qui est attendu de lui, ce qui favorise une interaction positive où les deux agents sont en phase par rapport à leurs buts respectifs (LEE & SEE, 2004). La recherche a montré que ces définitions étaient transposables aux interactions entre un agent humain et un système automatisé (REEVES & NASS, 1996 ; PARASURAMAN & RILEY, 1997). La notion de confiance peut être donc utilisée pour comprendre la façon dont les agents humains vont interagir avec l'automatisation (GEELS-BLAIR, RICE & SCHWARK, 2013). Elle constitue même une problématique centrale pour les chercheurs du domaine de la robotique (HANCOCK ET AL., 2011) et de l'automatisation (HOFF & BASHIR, 2015). Dans la sous-section suivante, nous allons mettre en évidence le rôle de la confiance dans le cadre de la conduite automobile automatisée.

II.1 Rôle de la confiance dans la conduite automobile automatisée

Les voitures hautement automatisées, telles qu'elles sont envisagées pour le moment, requièrent la présence de l'agent humain. Comme nous l'avons présenté dans le chapitre I, au niveau 4 de la taxonomie de la SAE, l'agent humain devra reprendre le contrôle de la voiture si les conditions ne permettent plus à l'automate d'assurer son contrôle. Par ailleurs, ce niveau d'automatisation permet à l'agent humain de ne plus regarder la route pour réaliser des tâches secondaires, non liées à la tâche principale de conduite. L'agent humain peut ainsi se retrouver hors de la boucle de conduite comme cela a été mentionné au chapitre II, et des études sur simulateur comme celle de CARSTEN, LAI, BARNARD, JAMSON ET MERAT (2012) ou celle de LLANERAS, SALINGER ET GREEN (2013) ont montré que ce phénomène « hors de la boucle » pouvait dégrader les performances de l'agent humain lors de la phase de reprise en main.

La confiance n'est pas une variable binaire. En effet, il y a des niveaux de confiance qui peuvent conduire à quatre façons d'utiliser l'automatisation de façon générale comme PARASURAMAN & RILEY (1997) l'ont présenté : *misuse*, *abuse*, *use* et *disuse*. L'utilisation d'un automatisme en mode « *misuse* » est symptomatique d'une confiance mal calibrée, et plus particulièrement d'une surconfiance (PARASURAMAN & RILEY, 1997). On parle de **surconfiance** quand l'agent humain a une confiance exagérée parce qu'il surestime les compétences réelles de l'automate qu'il utilise (LEE & SEE, 2004). Ce niveau de confiance peut conduire à une mauvaise

utilisation de l'automatisation, c'est-à-dire à son utilisation en dehors des plages de fonctionnement pour lesquelles elle a été conçue. Par exemple, cette surconfiance peut être la cause d'un phénomène de « complaisance[18] », que l'on peut rencontrer dans les situations qui présentent les caractéristiques suivantes (PARASURAMAN & MANZEY, 2010) :

1. Un agent humain surveille un système automatisé qu'il utilise.
2. La fréquence de surveillance de ce système par l'agent humain est inférieure à un standard ou une valeur optimale définie (MORAY & INAGAKI, 2000).
3. Cette fréquence faible de surveillance se manifeste concrètement par des conséquences en termes de sous-performances (PARASURAMAN, MOLLOY & SINGH, 1993).

À côté des effets négatifs d'une utilisation en mode « *misuse* », il y a également ceux engendrés par une utilisation en mode « *disuse* ». Dans ce cas, l'agent humain a une **sous-confiance** en l'automate, c'est-à-dire qu'il lui fait très peu confiance. On observe un tel niveau de confiance quand l'agent humain sous-estime les compétences réelles de l'agent technique (LEE & SEE, 2004). Dans ce cas, il est méfiant, ce qui peut conduire à une non-utilisation de celui-ci. Quant à l'utilisation « abuse » de l'automatisation, elle s'inscrit plus en amont au niveau de la conception. Il s'agit d'automatiser des fonctions pour des raisons économiques et technologiques indépendamment de la prise en compte de l'impact de cette automatisation sur les performances de l'agent humain.

Ainsi, le plus important dans l'interaction entre l'agent humain et l'automatisation n'est pas de générer un niveau minimal de confiance chez l'agent humain en l'automatisation mais d'en générer un qui soit approprié (LEE & SEE, 2004). Les résultats des travaux de PARASURAMAN ET RILEY (1997) et de MCGUIRL ET SARTER (2006) tendent à corroborer ces propos. En effet, ces auteurs ont montré que des niveaux inappropriés de confiance conduisaient à des temps de réaction élevés chez l'agent humain et à de mauvaises réactions dans des situations dangereuses. L'analyse des accidents a déjà montré le rôle négatif joué par la surconfiance ou la sous-confiance placée par l'agent humain en l'automatisme (WICKENS, HOLLANDS, BANBURY & PARASURAMAN, 2013 ; ROBINETTE, LI, ALLEN, HOWARD & WAGNER, 2016). Par conséquent, une bonne calibration de la confiance est nécessaire. C'est un aspect qu'il faut prendre en compte dans la conception des interfaces. En effet, une bonne calibration de la confiance conduit à des niveaux appropriés de confiance, c'est-à-dire des niveaux qui correspondent aux capacités réelles de l'agent technique ; cette calibration doit s'établir entre la sous-confiance et la surconfiance comme l'ont modélisé LEE ET SEE (2004). Afin de mieux intégrer cet aspect dans nos travaux, nous allons porter une attention particulière sur les facteurs qui l'influencent dans les lignes suivantes.

II.2 Facteurs qui influencent la calibration de la confiance

SCHAEFER ET AL. (2014) ont proposé un modèle triadique de ces facteurs. Ceux-ci peuvent être liés à l'agent humain, à l'automate ou au contexte d'utilisation de cet automate. Le lecteur qui souhaite connaître l'exhaustivité de ces facteurs, est invité à lire SCHAEFER ET AL. (2014) ou HOFF ET BASHIR (2015).

Dans cette sous-section, nous n'aborderons que quelques-uns d'entre eux : la connaissance que l'agent humain a du système automatique, sa prédictibilité et les feedbacks qui lui sont

[18] La complaisance peut également amener un opérateur humain à utiliser un système automatique qui produisait des solutions sous optimales en le sachant pertinemment.

retournés pendant son fonctionnement. Si nous reconnaissons que ces facteurs sont loin d'être indépendants les uns des autres, nous avons choisi de les présenter de façon séparée pour des besoins de lisibilité.

- **La connaissance que l'agent humain a du système automatisé avant de l'utiliser.** Celle-ci est acquise par la présentation qui est faite à l'agent humain de ce qu'est le système automatisé, grâce à la formation qu'il a reçue en rapport avec son utilisation et à ses expériences passées. Une connaissance pauvre de l'automate conduira l'agent humain à mal à calibrer sa confiance en lui (HOFF & BASHIR, 2015). Cette connaissance permet à l'agent humain de former des attentes concernant le comportement du système automatisé (BARG-WALKOW & ROGERS, 2016 ; MAYER, ROGERS & FISK, 2009). Par ailleurs, SAUER, CHAVAILLAZ ET WASTELL (2016) ont montré que le niveau de fiabilité des automatismes expérimentés par l'agent humain au cours de sa formation (à l'utilisation du système automatisé) influençait la confiance qu'il avait en eux lors de la session de test qui suivait. MADHAVAN ET WIEGMANN (2005) et MAYER, SANCHEZ, FISK ET ROGERS (2006) ont montré, quant à eux, que donner des informations sur la fiabilité du système automatisé aux participants les aide à l'utiliser correctement. Des études telles que celle de MANZEY, REICHENBACH ET ONNASCH (2012) et celle de YULIVER-GAVISH ET GOPHER (2011), ont mis en évidence qu'une expérience positive avec un automate poussait l'agent humain à lui faire (plus) confiance. MANZEY ET AL. (2012) ont également relevé que des expériences passées et négatives chez l'agent humain conduisaient à une diminution de la confiance dans un système automatisé d'identification des fautes. En outre, l'agent humain doit en particulier savoir comment les performances de l'automatisme varient en fonction des contextes comme l'ont précisé COHEN ET AL. (1998). Un aspect important à relever en ce qui concerne la conduite automobile est que les agents humains qui pratiquent la conduite manuelle ne sont pas experts comme les pilotes d'avions. Puisque l'automatisation de la conduite est nouvelle et jugée complexe (BANKS, STANTON & HARVEY, 2014), il est important que l'agent humain ait une certaine connaissance de cette automatisation pour appréhender le comportement de la voiture autonome avant son utilisation (KORBER & BENGLER, 2014).

- **La prédictibilité du comportement des automatismes.** Celle-ci fait référence à la façon dont les comportements du système correspondent aux attentes de l'agent. Les études menées par CAHOUR & FORZY (2009) sur la prédictibilité ont montré que lorsque ce système a des comportements prédictibles, les agents humains peuvent commencer à lui faire confiance. À l'inverse, le niveau de confiance diminue quand les agents humains font face à des réactions non anticipées de la part de l'automate (WIEGMANN, EGGMAN, ELBARDISSI, PARKER, & SUNDT, 2010). Ainsi, un aspect important à prendre en considération lors de sa conception est de s'assurer qu'il soit prédictible et qu'il le reste tant que l'agent humain est en interaction avec lui.

- **Les retours d'informations faits par le système pendant son fonctionnement.** L'interface joue un rôle central dans les interactions entre l'agent humain et sa voiture. L'importance des feedbacks communiqués par l'automatisation a été mise en évidence par NORMAN (1990). Dans le contexte particulier de la conduite autonome, plusieurs chercheurs ont mis en évidence l'importance d'informer l'agent humain sur les performances et les limites de l'automate. Par exemple, DZINDOLET, PETERSON, POMRANKY, PIERCE ET BECK (2003) ont montré que les agents humains avaient une confiance plus appropriée en l'automatisme lorsque des feedbacks continus sur ses « sorties » leur étaient donnés, que lorsqu'ils n'en avaient pas. De même, les travaux de STANTON, YOUNG

ET MCCAULDER (1997) ont mis en évidence que les conducteurs qui avaient une connaissance insuffisante des limitations de l'ACC, provoquaient plus de collisions parce qu'ils avaient des niveaux inappropriés de confiance en ce dispositif. Dans la phase de reprise en main, les résultats de HELLDIN, FALKMAN, RIVEIRO ET DAVIDSSON (2013) ont montré que l'affichage d'une information d'incertitude sur les analyses et les décisions de l'automate, permettait aux agents de mieux reprendre en main leur voiture en comparaison avec les agents humains qui ne l'avaient pas.

Les facteurs que nous venons de présenter mettent en avant deux types de connaissances qui favorisent la confiance en l'automate. En effet, il y a la connaissance que l'agent humain a du comportement de l'automate avant son utilisation, et la connaissance que l'agent humain a de l'automatisme pendant son utilisation. Si le premier niveau de connaissance est assuré par la formation et les expériences passées que l'agent humain a eues avec son système, le deuxième niveau de connaissance est lié aux informations renvoyées par celui-ci par les interfaces. Dans nos travaux, ces deux niveaux de connaissances seront intégrés de la façon suivante :

- **Intégration du premier niveau de connaissance** : Elle sera à prendre en compte pour la validation expérimentale que nous ferons sur simulateur de voiture hautement automatisée. En effet, celles-ci constituant une nouveauté pour la plupart des personnes, la qualité de l'information qu'ils recevront en amont de leur interaction avec ce type de véhicule influencera la confiance qu'ils lui accorderont durant l'interaction. Nous veillerons donc à présenter les comportements possibles du véhicule, avant les tests de simulation, ceci afin d'éviter des effets de surprise.

- **Intégration du deuxième niveau de connaissance** : Celle-ci sera prise en compte lors de la conception des interfaces que nous allons proposer. Se pose donc la question de la quantité des informations que l'interface devra contenir pour que l'agent humain puisse comprendre le fonctionnement de la voiture autonome de niveau SAE 4.

Pour définir ces informations, KARTENSY ET BOTHEREL (2005) ont introduit la notion de transparence « réussie » pour mettre en évidence le comportement de l'automate. Une telle transparence favoriserait la relation de confiance entre l'agent humain et le système automatisé. Par conséquent, dans la logique de conception de l'IHM que nous envisageons, une transparence réussie de la voiture autonome permettrait à l'agent humain de comprendre l'automate. Nous présentons donc la notion de transparence dans la section suivante, avec pour objectif de l'intégrer dans nos travaux.

III. La transparence

Le dictionnaire Larousse propose cinq définitions du mot *transparent* :

- **Définition 1** : Se dit d'un corps transmettant la lumière par réfraction et au travers duquel les objets sont visibles avec netteté.
- **Définition 2** : Se dit d'un matériau qui laisse passer la lumière.
- **Définition 3** : Se dit d'un tissu, d'un papier, d'une peau assez fine pour qu'on voit à travers.
- **Définition 4** : Dont les raisons ou le sens sont faciles à deviner.
- **Définition 5** : Qui a un fonctionnement clair, que l'on ne cherche pas à dissimuler à l'opinion.

Ces définitions permettent d'identifier deux grandes approches. Dans l'approche 1, les définitions 1, 2, 3 indiquent qu'un objet ou système est transparent s'il est possible de voir au travers de lui. Dans l'approche 2, relative aux définitions 4 et 5, un objet ou système est transparent si on comprend facilement son fonctionnement (approche 2). Même si ces deux approches sont très similaires, elles sont fonctionnellement très différentes (OSOSKY, SANDERS, JENTSCH, HANCOCK & CHEN, 2014). Si l'approche 1 gère un aspect de forme, l'approche 2 gère l'aspect fond et nous avons privilégié cette approche dans nos travaux.

Selon cette approche, les systèmes transparents communiquent des informations qui permettent de comprendre comment ils fonctionnent et/ou ce qu'ils font. Dans la littérature qui traite de l'interaction entre un agent humain et un système automatisé, plusieurs auteurs définissent la transparence d'un système selon cette caractéristique. Par exemple, PREECE, ROGERS ET SHARP (2002) définissent un système transparent comme un système facilement compréhensible et intuitif. CRING ET LENFESTEY (2009), quant à eux, ont suggéré que la transparence renvoie à la prédictibilité perçue et à la compréhension que l'agent humain a d'un comportement spécifique de l'automatisation. KIM ET HINDS (2006) ajoutent que si les agents humains ne comprennent pas la logique de fonctionnement du système, les comportements normaux et même de routine de celui-ci peuvent être alors perçus comme des erreurs par les agents humains. Cependant, même si une transparence élevée (révélant plusieurs informations du fonctionnement de l'automate) est en général préférée[19] par les agents humains (SANDERS, WIXON, SCHAEFER, CHEN & HANCOCK, 2014), un nombre trop important d'informations peut conduire à une surcharge informationnelle et affecter ainsi les niveaux 1 et 2 de la SA comme nous l'avons vu au chapitre II. Puisque nos travaux concernent la conduite automobile, nous présentons dans le paragraphe suivant, la façon dont la transparence a été étudiée dans ce domaine.

III.1 Transparence dans la conduite automobile

Quelques auteurs ont travaillé sur la transparence de l'automate dans le cadre de la conduite automobile. Par exemple, pour favoriser une bonne reprise en main, ERIKSSON ET STANTON (2015), ont proposé d'utiliser les quatre maximes de GRICE (1975) pour augmenter la transparence de la voiture autonome. Parmi ces maximes, figurent :

[19] La préférence est un facteur émotif de confiance lié à l'agent humain (HOFF & BASHIR, 2015).

- **La maxime de la quantité** qui stipule qu'aucune information non nécessaire ne doit être ajoutée à l'interface.
- **La maxime de la qualité** qui stipule que toutes les informations renvoyées par le système automatisé doivent être vraies.
- **La maxime de la relation** qui stipule que toutes les informations doivent être contextualisées et pertinentes par rapport à la tâche qui est en train d'être réalisée par l'automate.
- **La maxime de la manière** qui stipule que l'ambiguïté doit être évitée et que l'information doit être présentée de manière structurée et brève.

ERIKSSON ET STANTON (2015) suggèrent ainsi que l'utilisation de ces maximes dans la conception de l'interface d'une voiture hautement automatisée va faciliter la construction d'une représentation mentale correcte du fonctionnement de l'automate et ainsi faciliter la phase de transition entre le mode automatique et le mode manuel. NAUJOKS, FORSTER, WIEDMANN ET NEUKUM (2016) se sont intéressés à la transparence de la voiture hautement automatisée au travers la communication d'informations sur les manœuvres à venir. Leurs résultats ont permis de déterminer que la modalité vocale facilitait l'extraction d'informations pertinentes pour la compréhension des intentions de l'automate.

Si ces travaux ne sont pas très nombreux, il existe des modèles de transparence proposés par certains auteurs qui peuvent être appliqués à la conduite automobile. Parmi ces modèles figurent par exemple, le modèle de *Situation Awareness-based Agent Transparency*, le modèle de LYONS (2013) et le modèle de MILLER (2014). Les paragraphes suivants porteront sur les deux premiers, car ils sont liés à la notion de Situation Awareness et facilement transposables au domaine automobile.

III.2 Modèle Situation Awareness-based Agent Transparency

CHEN ET AL. (2015) ont proposé un modèle de transparence fondé sur la théorie de la SA (ENDSLEY, 1995) et sur le cadre Croyances-Désirs-Intentions (RAO & GEORGEFF, 1995). Comme le modèle D'ENDSLEY (1995) de la SA, le modèle SAT est divisé en trois niveaux :

- **Niveau 1** : À ce niveau, on fournit à l'agent humain les informations basiques relatives à l'état actuel, aux buts, aux intentions et aux actions proposées par l'agent technique.
- **Niveau 2** : À ce niveau, on fournit à l'agent humain les informations relatives au processus de fonctionnement de l'agent technique.
- **Niveau 3** : À ce niveau, l'agent technique fournit à l'agent humain les informations relatives à l'état futur de la situation à gérer ; il s'agit notamment des conséquences prédites des actions, de leur probabilité de succès ou d'échec et de toute incertitude associée aux projections faites.

Le modèle *Situation Awareness-based Agent Transparency* met en avant la *Situation Awareness* de l'agent humain, notion très importante comme nous l'avons évoqué au chapitre II. Cependant, il s'agit plus d'une grille permettant de valider a posteriori la pertinence d'une IHM que d'un modèle d'aide à la conception.

III.3 Modèle de Lyons

LYONS (2013) a traité la question de la transparence selon deux aspects : la transparence d'un robot pour l'humain et la transparence de l'humain pour le robot ; le robot renvoyant ici à un système automatisé.

La transparence du robot fait référence à l'ensemble des informations que le robot doit communiquer à l'humain (LYONS, 2013). Cette transparence repose sur différents modèles : le modèle de l'intention, le modèle de la tâche, le modèle analytique et le modèle environnemental.

- **Le modèle de l'intention :** L'intention renvoie ici au but général pour lequel le robot a été conçu, ou encore à son objectif global. À ce niveau, deux questions se posent :
    - Quelle est la raison d'être du robot ?
    - De façon macroscopique, quelles fonctions est-il en mesure de réaliser ?

  Pour distinguer « l'intention dans l'action » de « l'intention au sens général » définie lors de la phase de conception, il nous a semblé plus judicieux de renommer ce modèle, « le modèle de l'objectif global » (du robot).

- **Le modèle de tâches :** LYONS (2013) précise que l'agent humain analyse les actions du robot selon un schéma cognitif particulier[20]. Le modèle de la tâche a donc pour but de fournir des éléments susceptibles d'aider l'agent humain à élaborer ce schéma cognitif. Il devra contenir en particulier des informations facilitant la compréhension d'une tâche donnée, celles relatives au but du robot à un instant donné, celles relatives à la progression du robot par rapport à son but, celles relatives aux tâches que peut réaliser le robot ainsi qu'une connaissance des erreurs qui pourraient survenir au cours de la réalisation de la tâche. Ces différentes informations permettent d'établir une représentation partagée, entre le robot et l'agent humain, des actions qui doivent être accomplies pour une tâche donnée. La communication de l'intention du robot relativement au but qu'il veut atteindre permet à l'agent humain de connaître l'état d'avancement de la tâche ainsi que la raison pour laquelle il réalise telle action ou adopte tel comportement. LYONS (2013) suggère que communiquer ces informations améliore la représentation que l'agent humain a des actions du robot et aide également à une meilleure supervision de celui-ci.

- **Le modèle analytique :** LYONS (2013) précise que pour atteindre le but qui lui est assigné lors de sa conception, un robot doit acquérir et analyser un nombre élevé de données. Étant donnée la complexité de ces informations, l'agent humain peut avoir des difficultés à comprendre comment le robot prend ses décisions. Le modèle analytique vise donc à communiquer à l'agent humain les principes analytiques utilisés par le robot lors de la prise de décision. Il a une grande utilité notamment dans les situations complexes où le niveau d'incertitude est élevé.

- **Le modèle de l'environnement :** Dans des conditions difficiles et potentiellement hostiles où les contraintes temporelles sont élevées (telles que les situations militaires), il est essentiel que les systèmes robotiques opèrent avec une dynamique en adéquation avec celle de leur environnement. Le robot doit communiquer à l'agent humain la compréhension qu'il a des variations topographiques, des conditions météorologiques, des menaces ainsi que des contraintes temporelles dans un environnement particulier. De telles informations indiquent à l'agent humain ce que le robot perçoit, et amélioreront la SA que l'agent humain a de son environnement. Par ailleurs, savoir que le robot

[20] Un schéma cognitif renvoie à une structure contenue en mémoire à long terme. Il est à différencier de la représentation mentale qui est une structure disponible en mémoire à court terme et construite sur la base des schémas disponibles et pertinents dans une situation donnée (voir chapitre II).

connaît les conditions environnementales va aider l'agent humain à calibrer la confiance qu'il peut lui accorder.

À côté de la transparence du robot pour l'agent humain, il faut prendre en considération la transparence de l'agent humain pour le robot. Cette transparence fait référence à l'ensemble des informations que le robot peut intégrer en ce qui concerne l'état de l'agent l'humain, ainsi que les informations partagées entre les deux décideurs pour gérer et comprendre le partage du travail (LYONS, 2013). Cette transparence repose donc sur deux modèles :

- **Le modèle du travail d'équipe :** Le robot et l'agent humain forment une équipe dans laquelle chacun doit pouvoir clairement identifier les buts qui lui sont assignés. Dans ce modèle, l'automate doit indiquer à l'agent humain les tâches dont il est responsable, les tâches dont l'agent humain est responsable et à quel niveau d'autonomie il fonctionne. Cette information permettra à l'agent humain de prédire les actions de l'automatisation.

- **Le modèle de l'état de l'humain :** C'est le modèle qui permet d'analyser l'état de l'agent humain. Grâce à ce modèle, le robot peut être en mesure d'estimer chez l'agent humain son niveau de stress, de surcharge cognitive, etc. Si le robot identifie une surcharge cognitive de l'agent humain, LYONS (2013) suggère qu'il réponde par une augmentation du niveau d'automatisation aussi longtemps que cet état est observé et qu'il réalise notamment les tâches critiques.

Si la structuration du modèle de Lyons en sous-modèles est appréciable, l'auteur ne précise pas, parmi toutes ces informations, celles qui sont les plus importantes. Or, pour coopérer, les agents en présence doivent comprendre et partager un ensemble d'informations issues de l'activité ; ces informations constituent, comme nous l'avons expliqué au chapitre I, le référentiel commun. Le partage de ces informations, comme nous l'avons également mentionné au chapitre I, s'appuient sur des échanges au niveau « prise d'information », « analyse d'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action » (DEBERNARD ET AL., 2009 ; PARASURAMAN ET AL., 2000). Par ailleurs, le modèle de LYONS (2013) ne précise pas non plus dans quelle situation telle ou telle information doit être présentée. En effet, une analyse de quelques interfaces en RA a mis en évidence un manque de structuration aussi bien au niveau de l'utilisation de l'espace qu'au niveau du choix des symboles. Par ailleurs, la hiérarchisation des informations doit également être définie, en tenant compte de la charge visuelle de l'agent humain et des dimensions des afficheurs disponibles. Nous y reviendrons ultérieurement. Dans le paragraphe suivant, nous présentons le modèle de transparence que nous avons retenu.

III.4 Choix d'un modèle de transparence

Nous avons comparé le modèle de Lyons et le modèle SAT selon trois paramètres (cf. Tableau 5), afin de choisir le modèle sur lequel reposeront nos travaux :

- **Les concepts-clés :** Il s'agit des principaux concepts utilisés le modèle.
- **L'approche** : Il s'agit du niveau de détail avec lequel le modèle aborde la transparence.
- **L'unilatéralité ou la bilatéralité** : Il s'agit de la façon dont la transparence est perçue : unilatéralité (transparence de l'agent technique pour l'agent humain <u>ou</u> transparence de l'agent humain pour l'agent technique) ou bilatéralité (transparence de l'agent technique vers l'agent humain <u>et</u> transparence de l'agent humain pour l'agent technique).

Tableau 5 : Tableau de comparaison des trois modèles de transparence

Modèles	Concepts-clés	Approche	Unilatéralité de la transparence
Modèle de Lyons	Coopération Situation Awareness	Par sous-modèles	Bilatéralité (transparence de l'agent technique vers l'agent humain et transparence de l'agent humain pour l'agent technique)
Modèle SAT	*Situation Awareness*	Par niveau de SA	Unilatéralité (transparence de l'agent technique pour l'agent humain)

L'analyse du Tableau 5 nous a permis de sélectionner le modèle de Lyons comme modèle-cadre de la transparence dans la suite de nos travaux. En effet, il fait ressortir des concepts-clés qui nous paraissent essentiels : la coopération entre l'automate et l'agent humain que nous avons présentée dans le chapitre I, et la SA que nous avons présentée dans le chapitre II. Par ailleurs, ce modèle fournit des points d'entrée précis qui permettront de le décliner dans le domaine de la conduite automobile. Pour structurer les différentes informations à présenter selon le modèle de LYONS (2013) et alimenter l'espace de travail commun, nous utiliserons les quatre fonctions de PARASURAMAN ET AL. (2000) : « acquisition de l'information », « analyse de l'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action ».

La

Figure 23 croise le modèle de Lyons avec les quatre fonctions de PARASURAMAN ET AL. (2000) représentée par les quatre rectangles bleus, au niveau de l'agent humain et de l'agent technique.

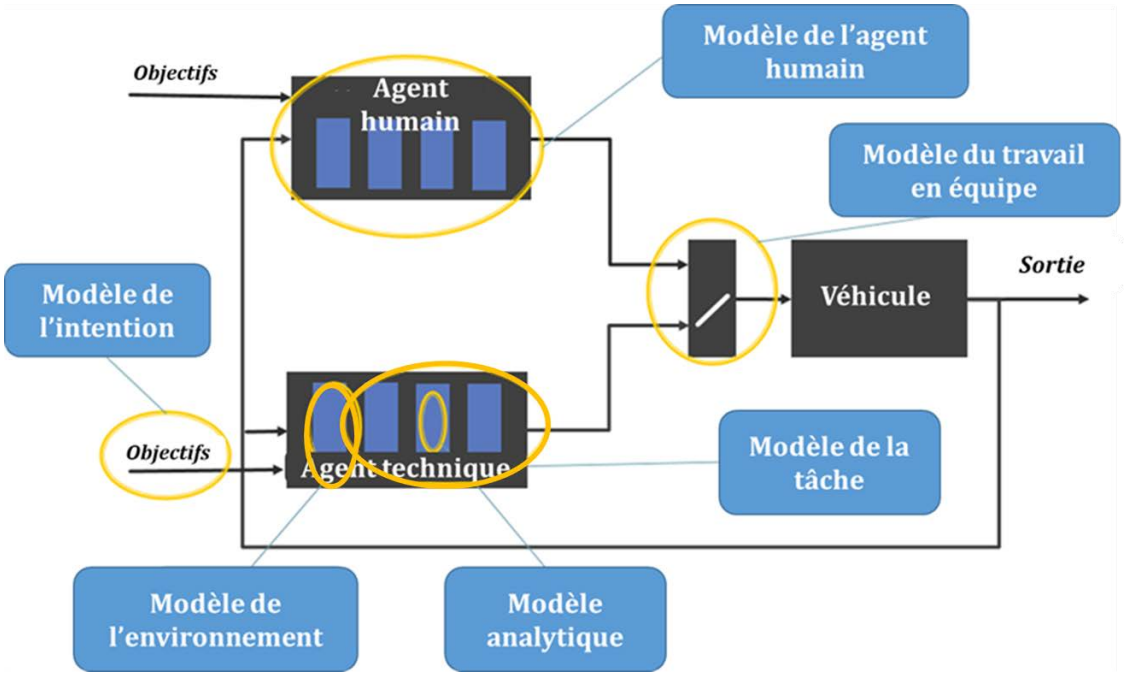


Figure 23: Le modèle de Lyons enrichi des fonctions cognitives

Cette section nous a permis d'examiner la notion de transparence que nous comptons adapter à notre objet d'étude, la voiture autonome de niveau 4 selon la taxonomie de la SAE. Si le concept semble pertinent, il n'est pas en lui-même suffisant. En effet, on parle de transparence de l'automatisme en rapport avec les informations qu'il va fournir. Ces informations doivent être définies et présentées de telle manière qu'elles soient compréhensibles par l'opérateur humain dans une voiture autonome. Nous sommes partis du postulat que ces informations devaient être équivalentes à celles dont le conducteur a besoin pour conduire en manuel.

Nous avons choisi de définir ces informations en utilisant une démarche par « contraintes » : la *Cognitive Work Analysis*. Dans cette approche, les contraintes renvoient aux limites de comportement du système qui doivent être respectées par les acteurs (êtres humains et/ou machines) pour que le système fonctionne effectivement (NAIKAR, 2013). Dans la section suivante, nous explicitons cette approche.

IV. Cognitive Work Analysis

Il existe plusieurs méthodes d'analyse du travail pour les systèmes sociotechniques complexes. Elles peuvent être classées en trois catégories : normatives, descriptives et formatives (RASMUSSEN, 1997 ; VICENTE, 1999) :

- **Les méthodes normatives :** Elles donnent une prescription du travail qui doit être fait dans un système. Elles sont utilisées dans des systèmes très stables tels que les lignes d'opérations d'assemblage. Elles peuvent contribuer à l'optimisation de la charge de travail et à la minimisation des erreurs parce qu'elles apportent des procédures décrivant précisément la manière idéale de réaliser une tâche (NAIKAR, 2013). Dans cette catégorie, on retrouve les méthodes d'analyse de la tâche qui spécifient les séquences des tâches ainsi que les temps d'exécution qui doivent être respectés par les agents.

- **Les méthodes descriptives :** Elles donnent, comme leur nom l'indique, une description de la manière dont le travail est réalisé dans un système. Elles sont appropriées dans les systèmes où les tâches des travailleurs ont une composante cognitive importante (NAIKAR, 2013). Dans cette catégorie, on trouve les méthodes d'analyse des tâches cognitives qui étudient les processus cognitifs mis en œuvre dans le cadre d'une tâche donnée (SEAMSTER, REDDING & KAEMPF, 1997).

- **Les méthodes formatives** fournissent des propositions sur la manière dont le travail peut être réalisé dans un système donné. Elles reconnaissent que les opérateurs ont plusieurs possibilités d'action. C'est à cette catégorie qu'appartient la CWA.

La CWA intègre le fait qu'il y a des situations ou des événements non anticipés qui peuvent se présenter à l'agent humain. Elle considère que le champ des situations qui peuvent survenir n'est pas restreint. Contrairement aux méthodes normatives et descriptives, elle offre la possibilité à l'agent humain de s'adapter à des situations non attendues. C'est une méthodologie qui met l'accent sur les contraintes que les acteurs doivent prendre en considération au sein d'un système sociotechnique donné (RASMUSSEN, 1986 ; RASMUSSEN, PEJTERSEN & GOODSTEIN, 1994 ; VICENTE, 1999). Dans le cadre de la CWA, les contraintes désignent les limites de comportement du système qui doivent être respectées par les acteurs pour que le système fonctionne correctement (NAIKAR, 2013). Ces contraintes peuvent être causales ou intentionnelles (NAIKAR, HOPCROFT & MOYLAN, 2005).

- **Les contraintes causales** : Elles sont basées sur les lois de la physique, telles que la loi de la thermodynamique. Les systèmes dits causaux sont des systèmes dans lesquels il y a prédominance des contraintes causales.

- **Les contraintes intentionnelles** : Elles sont liées aux lois sociales, aux conventions, aux règles formelles et informelles, et aux valeurs morales. Les systèmes dits intentionnels sont des systèmes dans lesquels il y a une prédominance des contraintes intentionnelles.

Ces contraintes définissent ainsi les comportements possibles ou acceptables ainsi que ceux qui ne le sont pas. Connaître ces contraintes permet également d'identifier les degrés de liberté pour l'action (Figure 24).

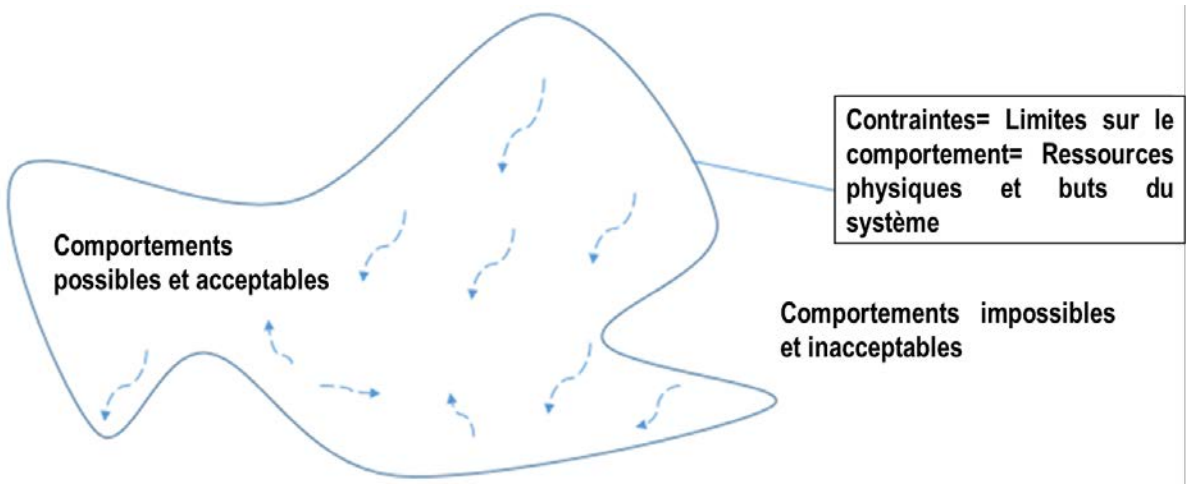


Figure 24: Contraintes associées à un système (schéma traduit de Naikar (2013)

La *Cognitive Work Analysis* est subdivisée en plusieurs étapes, chaque étape se focalisant sur un type de contraintes en particulier. Elles sont abordées dans le paragraphe suivant.

IV.1 Étapes de la Cognitive Work Analysis

Les cinq étapes composant la méthode ont été nommément citées par VICENTE (1999) et RASMUSSEN ET AL. (1994). La labellisation de VICENTE (1999) demeure néanmoins la plus répandue dans la littérature. Ces étapes, successives, sont les suivantes :

- **L'analyse du domaine de travail (WDA[21])** : Cette analyse se focalise sur la formalisation des contraintes associées au fonctionnement de l'environnement culturel, social ou physique des acteurs (NAIKAR, 2013). Modéliser le fonctionnement structurel permet aux acteurs de connaître les buts que le système doit atteindre. Ils pourront ainsi faire le lien entre ces buts et les objets physiques dont le système dispose (NAIKAR, 2013). Les outils principaux que cette analyse utilise sont l'espace d'abstraction-décomposition et la hiérarchie d'abstraction.

- **L'analyse de la tâche (ConTA[22])** : Cette analyse se focalise sur la formalisation des contraintes associées à ce qui doit être fait dans le système. Elle identifie l'activité requise pour que les buts du système soient atteints avec les ressources physiques disponibles (NAIKAR, 2013). Cette activité peut être caractérisée en termes de situations de travail, fonctions de travail ou de tâches de contrôle (NAIKAR, MOYLAN & PEARCE, 2006 ; RASMUSSEN ET AL., 1994 ; VICENTE, 1999). Les outils principaux que cette analyse utilise sont le *template* d'activité contextuelle pour la modélisation des situations et fonctions de travail, et l'échelle de décision pour la modélisation des tâches de contrôle.

- **L'analyse des stratégies (StrA[23])** : Cette analyse se focalise sur la formalisation des contraintes associées aux différentes façons de réaliser l'activité qui correspondent aux stratégies. Généralement, plusieurs stratégies sont possibles pour réaliser une activité

[21] Work Domain Analysis
[22] Control Task Analysis
[23] Strategies Analysis

(NAIKAR, 2013). L'outil utilisé à cette étape est la carte du flux d'informations. Cependant, il n'existe pas de version générique de cet outil.

- **L'analyse de la coopération et de l'organisation sociale (SOCA[24])** : Cette analyse se focalise sur la formalisation des contraintes que l'allocation, la distribution et la coordination du travail imposent aux acteurs (NAIKAR, 2013). Dans un système, il est possible que les différents agents s'organisent de différentes façons. Chaque possibilité d'organisation doit être en rapport avec le domaine de travail, les situations de travail, les fonctions de travail, les tâches de contrôle ou les stratégies. RAUFFET, CHAUVIN, MOREL ET BERRUET (2015) proposent d'aborder explicitement la question de l'allocation dynamique des fonctions à cette étape-là.

- **L'analyse des compétences (WCA[25])** : Cette analyse se focalise sur la formalisation des contraintes associées aux compétences nécessaires pour assurer l'activité. Les capacités cognitives de l'homme et ses limitations contraignent en effet la façon dont les attentes d'un système peuvent être satisfaites (NAIKAR, 2013). Le modèle *Skills-Rules-Knowledge* [26]ou SRK de RASMUSSEN (1986), déjà présenté dans le chapitre précédent, est un outil utile à cette analyse.

Ces cinq étapes ne sont pas décorrélées (Figure 25). En effet, comme le précise NAIKAR (2013), dans un domaine de travail, il y a plusieurs activités possibles. Pour une activité, il y a plusieurs stratégies de réalisation. La mise en œuvre d'une stratégie donnée induit une organisation spécifique. Enfin, une organisation dépend des agents en présence.

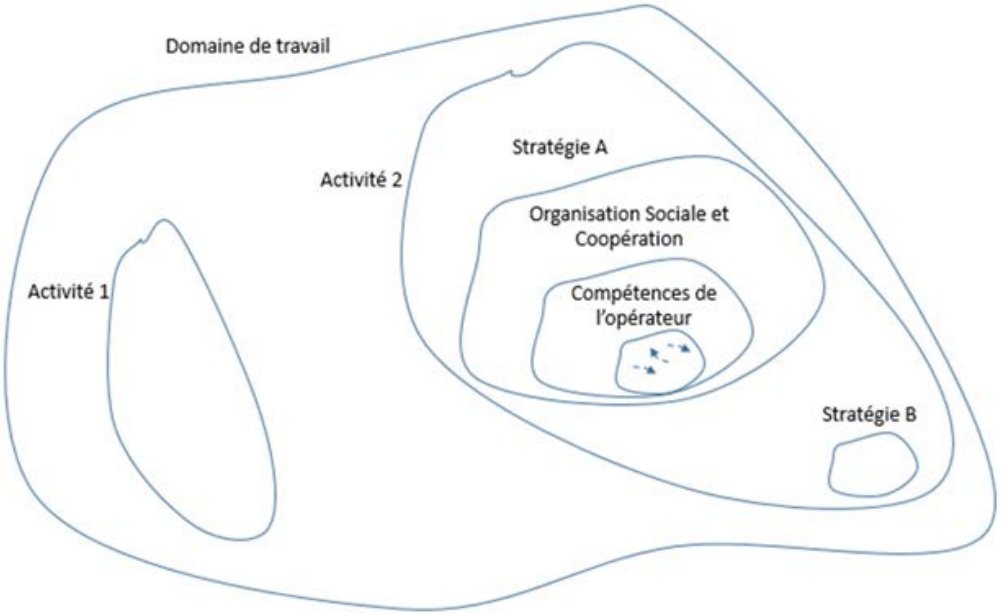


Figure 25 : Relation entre domaine de travail, activités, organisation sociale et coopération, stratégies et compétences (schéma traduit de Naikar (2013))

[24] Social Organization & Cooperation Analysis
[25] Worker Competencies Analysis
[26] Ce modèle est présenté au chapitre 2.

Dans le cadre nos travaux, nous nous sommes focalisés sur les deux premières étapes de la CWA : la *Work Domain Analysis* et la *Control Task Analysis*. Ces deux étapes sont suffisantes pour définir les besoins informationnels du conducteur et, in fine, pour déterminer les informations que l'automate devra lui fournir en utilisant des principes de transparence. La section suivante présente de façon plus détaillée l'analyse du domaine de travail.

IV.2 Analyse du domaine de travail

Comme nous l'avons expliqué précédemment, l'analyse du domaine de travail se focalise sur les contraintes associées à la structure fonctionnelle de l'environnement dans lequel les acteurs travaillent (NAIKAR, 2013). Il est important de préciser que la WDA s'intéresse aux environnements des agents et non aux comportements des agents, même si la structuration des environnements induit des comportements spécifiques. L'espace de décomposition et d'abstraction est l'outil principal utilisé par la WDA pour modéliser l'espace physique des agents humains. Il est divisé en deux dimensions orthogonales : la dimension abstraction et la dimension décomposition.

a) La dimension « abstraction »

Encore appelée hiérarchie d'abstraction, la dimension « abstraction » comprend cinq niveaux (RASMUSSEN, 1986 ; RASMUSSEN ET AL., 1994, NAIKAR, 2013) :

- **Niveau 1 : les buts fonctionnels (BF).** Ce niveau formalise les contraintes en termes de propriétés de l'environnement (RASMUSSEN ET AL., 1994). Il s'agit précisément des objectifs et des limites externes à l'activité. Les objectifs peuvent être de deux types : les objectifs primaires et les objectifs secondaires. Les objectifs primaires renvoient aux raisons fondamentales pour lesquelles le système a été créé. Les objectifs secondaires, quant à eux, renvoient aux conditions qui doivent être satisfaites pour que les objectifs primaires soient atteints. Les limites externes font référence aux valeurs imposées par la société ou à celles imposées par des entités extérieures au système. Par exemple, BIRRELL, STEWART, YOUNG, JENKINS, ET STANTON (2012), dans le cadre de leurs travaux dans le projet Foot-LITE[27], ont identifié trois buts fonctionnels :
  - BF 1 : L'utilisation écologique de la route,
  - BF 2 : L'utilisation de la route en toute sécurité,
  - BF 3 : L'utilisation efficace de la route.

  Les objectifs secondaires et les limites externes peuvent être également considérés au niveau 2 : les valeurs et les mesures de priorité.

- **Niveau 2 : les valeurs et les mesures de priorité (VMP).** Ce niveau représente les critères qui doivent être respectés pour que le système atteigne ses objectifs fonctionnels. Ils proviennent des lois fondamentales, des principes ou des valeurs qui servent de base d'évaluations ou de jugements. Ces critères permettent de comparer, de hiérarchiser et d'allouer les ressources pour le niveau inférieur afin que les objectifs fonctionnels soient atteints. Ces critères sont abstraits (RASMUSSEN ET AL., 1994) et sont par définition relativement stables. Par exemple, BIRRELL ET AL. (2012), dans le cadre de leurs travaux dans le projet Foot-LITE, ont identifié dix valeurs et mesures de priorité :
  - VMP 1 : Réduire l'empreinte Carbone,

[27] Foot LITE est un consortium anglais de plusieurs compagnies, organisations et universités dont le but est de développer un système de conseil sur le style de conduite.

- VMP 2 : Réduire les émissions favorisant la pollution,
- VMP 3 : Réduire les impacts environnementaux de la conduite à un niveau local,
- VMP 4 : Réduire le risque, le nombre et la gravité des accidents/incidents routiers,
- VMP 5 : Réduire le comportement inapproprié du conducteur (agent humain),
- VMP 6 : Favoriser le bon comportement du conducteur,
- VMP 7 : Satisfaire les besoins de mobilité personnelle,
- VMP 8 : Augmenter la prédictibilité des temps de trajet,
- VMP 9 : Réduire le coût de l'utilisation de la route,
- VMP 10 : Augmenter le flux routier.

- **Niveau 3 : les fonctions générales (FG).** Ce niveau représente les fonctions que le système doit être en mesure de mettre en œuvre pour atteindre ses objectifs fonctionnels. Décrites comme indépendantes des ressources physiques, ces fonctions doivent néanmoins tenir compte des ressources disponibles. Ainsi, une fonction peut être assurée par plusieurs objets et un objet peut contribuer à plusieurs fonctions. Dans le cadre de leurs travaux, BIRRELL ET AL. (2012) ont établi que, pour atteindre ses buts fonctionnels, Foot-LITE doit informer et influencer les choix du conducteur ainsi que son comportement. Ils ont ainsi défini plusieurs fonctions générales parmi lesquelles :
  - FG 1 : Influencer le choix de transport,
  - FG 2 : Favoriser l'*awareness* de l'impact des choix de transport,
  - FG 3 : Améliorer la communication entre le véhicule et le conducteur,
  - FG 4 : Réduire les pertes énergétiques du véhicule,
  - FG 5 : Améliorer la façon dont les informations sont communiquées au conducteur,
  - FG 6 : Améliorer les styles et les techniques de conduite,
  - FG 7 : Améliorer la gestion de la route,

- **Niveau 4 : les processus associés aux objets.** Ce niveau représente les processus fonctionnels, les capacités fonctionnelles ou les limites des objets du système qui peuvent être naturels ou abstraits. Certains auteurs intègrent à ce niveau les noms des objets physiques pour les associer à leurs rôles (MILLER & VICENTE, 1998) ou pour donner plus de détails sur les processus fonctionnels (HADJUKIEWICZ & BURNS, 2004). Dans leur étude sur les systèmes de transport routier, SALMON, STEPHAN, LENNE ET REGAN (2005) ont défini plusieurs processus relatifs aux voitures notamment les capacités du véhicule et les limitations du véhicule.

- **Niveau 5 : les objets physiques.** Ce niveau est rattaché au monde physique du système (RASMUSSEN ET AL., 1994). Il contient les objets physiques du système mais les objets artificiels peuvent y être joints également. Les informations suivantes peuvent être associées à chaque objet : nom, nombre, type, forme, couleur, dimensions, position, topographie, etc. Malheureusement, ces données sont parfois omises. Dans leur étude sur les systèmes de transport routier, SALMON ET AL. (2005) ont identifié plusieurs objets répartis en différentes catégories :
  - Les composants pour contrôler le véhicule. Parmi eux figurent par exemple, le volant, les afficheurs du tableau de bord, la pédale d'accélération, la pédale de frein, les rétroviseurs, etc.
  - Les systèmes de transport intelligent. Parmi eux, figurent par exemple, les systèmes d'avertissement de collision et les systèmes d'aide au changement de voie.

- Les autres composants internes tels que la radio.
- Les composants de sécurité. Parmi eux, figurent par exemple, les airbags et les ceintures de sécurité.
- Les composants externes. Parmi eux, figurent par exemple, les rétroviseurs extérieurs, les roues.
- Etc.

Ces niveaux peuvent être divisés en deux catégories (NAIKAR, 2005). Les trois premiers niveaux définissent le comportement du système. Quant aux deux autres, ils définissent les ressources associées au comportement du système. Bien que relatif au même domaine de travail, chaque niveau d'abstraction a sa terminologie (NAIKAR, 2005). Chaque niveau est associé à un autre par des relations dites « moyens-fins ». Ces relations structurelles tendent à être multiples dès que le système sociotechnique est complexe (NAIKAR, 2005). Il est possible d'appréhender la complexité du système en le décomposant, ce qui se fait au moyen de la dimension « décomposition ».

b) La dimension « décomposition »

Encore appelée hiérarchie de décomposition, la dimension « décomposition » permet de représenter l'espace de problèmes à plusieurs niveaux du système. Il y a donc une décomposition pour :

- Le système dans sa totalité,
- Chacun des sous-systèmes,
- Chacun des composants.

En fonction du sens "$composants \rightarrow sous-systèmes \rightarrow système\ global$" ou "$système\ global \rightarrow sous-systèmes \rightarrow composants$", on réalise respectivement un "zoom arrière" ou un "zoom avant" selon le niveau de détail recherché. Le Tableau 6 présente un exemple de décomposition et d'abstraction extrait de l'étude menée dans le domaine du transport routier australien par SALMON, STEPHAN, LENNE ET REGAN (2005).

Tableau 6: L'espace de décomposition et d'abstraction appliqué au système de transport routier australien (extrait[28] de Salmon, et al. (2005)).

	Système global *Système de transport routier*	**Sous-système** *Infrastructure routière*	**Composant** *Conducteurs, véhicules ou piétons*
Buts fonctionnels	**Buts :** • Transport sûr, efficace, agréable et confortable des personnes et des biens • Mobilité sûre et efficace **Contraintes externes :** • Directives, stratégies et politiques du trafic routier	**Buts :** • Fournir un environnement convenable pour le transport sûr, efficace, agréable et confortable des personnes et des biens **Contraintes externes :** • Contraintes physiques et spatiales • Code de la route • Standards et recommandations du système routier • Etc.	**Buts :** • Fournir le moyen pour un déplacement sûr, efficace, agréable et confortable **Contraintes externes :** • Standards et recommandations pour la conception d'un véhicule • Permis de conduire • Etc.

[28] Pour voir le tableau complet, le lecteur est invité à se référer à l'article SALMON ET AL. (2005)

Fonctions abstraites	**Critères :** • Temps de trajet • Enquêtes de satisfaction des usagers de la route • Minimiser le risque des usagers de la route • Etc.	**Critères :** • Temps de trajet • Maximiser la sécurité, le confort et le plaisir • Surveiller les conditions de la route • Etc.	**Critères :** • Test de sécurité • Test de performance • Etc.
Fonctions générales	• Comportement sûr de l'usager de la route • Inspection, maintenance et réparation du système routier • Etc.	• Conduite sûre et efficace • Marche sûre et efficace • Conduite des vélos sûre et efficace • Etc.	• Dynamiques physiques (vitesse, manœuvrabilité, etc.) • Sécurité • Confort • Etc.
Fonctions physiques	• Transport des personnes et des biens du point de départ au point d'arrivée. • Dynamiques du trafic	• Informer les usagers de la route • Contrôler le comportement des usagers de la route • Restreindre ou favoriser les mouvements des usagers de la route • Etc.	• Fonctionnalité du véhicule • Capacités du véhicule • Limitations du véhicule • Etc.
Objets physiques	• Véhicules • Usagers de la route • Signalisation routière • Etc.	• Type de route • Marquage routier • Composition de la route • Etc.	• Composants de sécurité (les airbags et les ceintures de sécurité, etc.) • Composants externes (les rétroviseurs extérieurs, les roues, Etc.) • Etc.

Pour atteindre un but du système grâce à un ensemble de composants, plusieurs tâches de contrôle peuvent être définies et analysées grâce à l'analyse de la tâche de contrôle.

IV.3 Analyse de la tâche de contrôle (ConTA)

Les principaux apports de la littérature concernant l'analyse de la tâche de contrôle viennent de RASMUSSEN ET AL. (1994), VICENTE ET PAWLAK (1994) et VICENTE (1999). L'essentiel des travaux est relatif à la définition du cadre conceptuel de l'analyse et traite peu des applications de la méthode (ROTH & MUMAW ,1995 ; SANDERSON & NAIKAR, 2000 ; BISANTZ, ROTH, BRICKMAN, GOSBEE, HETTINGER & MCKINNEY, 2003). NAIKAR, MOYLAN ET PEARCE (2006) précisent que l'application de la ConTA est limitée à cause d'un manque de cohérence des concepts théoriques et du cadre méthodologique. Pour prendre en compte les spécificités du domaine militaire, les bases conceptuelles de la ConTA ont dû être étendues (RASMUSSEN ET AL. 1994 ; VICENTE, 1999 ; NAIKAR ET AL., 2006). La ConTA consiste désormais en deux décompositions : la décomposition de l'activité en situations de travail et/ou fonctions de travail et la décomposition en tâches de contrôle.

- **La décomposition en situations de travail :** Cette décomposition n'est possible que si l'activité peut être segmentée dans le temps et dans l'espace. Par exemple, dans la conduite automobile, on peut distinguer par exemple deux situations de « travail » : une phase de de suivi de voie et une phase de changement de voie.

- **La décomposition en fonctions de travail :** Quand une activité ne peut être clairement segmentée dans le temps et dans l'espace, elle est définie par son contenu. Dès lors, la décomposition en fonctions de travail est plus judicieuse. Cette décomposition ne sied pas à la conduite routière. Cependant pour l'illustrer, nous pouvons prendre l'exemple du conducteur de tramway qui assure deux fonctions principales de travail :
    - Fonction 1 : le déplacement du tramway,
    - Fonction 2 : la montée et la descente des usagers dans le tramway en toute sécurité.

Une activité peut être décomposée en plusieurs situations de travail. Chacune de ces situations peut aussi être décomposée en fonctions de travail. Il est possible qu'une fonction de travail soit commune à plusieurs situations de travail mais pas à toutes. Une illustration de ce type de décomposition est l'activité d'un pilote dans un avion de frappe militaire (NAIKAR ET AL., 2006). Cette activité peut être décomposée en trois situations de travail : l'infiltration de la zone cible, la présence dans la zone cible et le départ de la zone cible. L'activité dans la situation de travail « présence dans la zone cible » peut être décomposée en trois fonctions de travail : l'évaluation de la situation, l'utilisation des armes pour atteindre la cible et l'utilisation des armes pour éviter les menaces. La décomposition en tâches de contrôle est consécutive à la décomposition en situations de travail et/ou fonctions de travail. La décomposition en tâches de contrôle est rendue possible grâce à un outil : l'échelle double (ou double échelle) de Rasmussen, encore connue sous le vocable anglosaxon « *decision ladder* » (Figure 26). On parle d'échelle double, parce qu'il y a une échelle gauche ascendante (partie gauche) et une échelle droite descendante (partie droite).

- **L'échelle gauche** représente les tâches de contrôle permettant d'identifier les états du système. L'état actuel d'un système ou d'un environnement est défini grâce à l'acquisition de l'information et au diagnostic. Au sommet de l'échelle-double, il s'agit de la représentation des tâches de contrôle relatives à l'évaluation du but. L'état actuel du système doit être confronté au but pour déterminer l'état-cible du système.

- **L'échelle droite** représente les tâches de contrôle relatives à la planification de l'action et à son exécution. En d'autres termes, il s'agit des actions de contrôle à réaliser pour atteindre l'état-cible du système.

Il y a deux considérations à prendre en compte dans la compréhension de cette double échelle (NAIKAR ET AL., 2006) :

1. Elle ne doit pas être appréhendée que dans un sens linéaire. En effet, des courts-circuits sont possibles d'une tâche de contrôle à une autre.

2. Elle peut avoir plusieurs points de départ et plusieurs points d'arrivée. En d'autres termes, l'activité ne commence pas nécessairement à partir du rectangle d'activation pour s'achever dans le rectangle d'exécution.

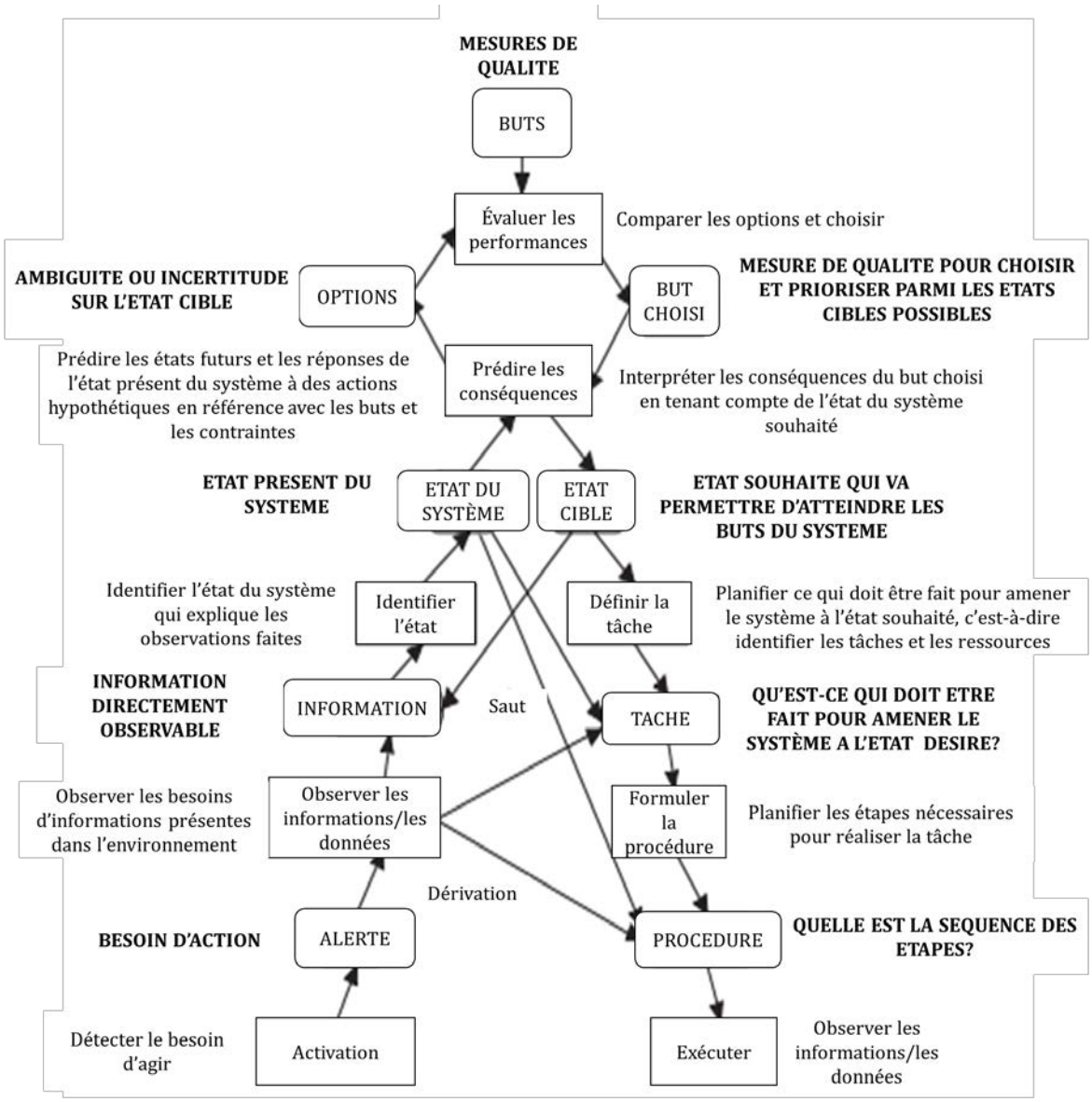


Figure 26 : Double échelle de Rasmussen (adapté à partir de Rasmussen,1986)

Lorsqu'une activité est décomposée en situations de travail, les tâches de contrôle doivent être identifiées par situation de travail. L'ensemble des situations de travail, des fonctions de travail et des tâches de contrôle peut être représenté par un outil, le modèle de l'activité contextuelle (Tableau 7). Il met en relation les situations de travail, les fonctions de travail et les tâches de contrôle de façon formative.

Tableau 7 : Modèle de l'activité contextuelle

	Situation de travail 1	Situation de travail 2	Situation de travail 3	Situation de travail 4	Situation de travail 5
Fonction de travail A					
Fonction de travail B					
Fonction de travail C					
Fonction de travail D					

Nous venons de présenter les deux premières étapes de la CWA que nous utiliserons dans le cadre de nos travaux pour définir le besoin informationnel de l'agent humain dans une voiture autonome de niveau 4. Il est important de relever que la CWA a déjà été utilisée dans la conception d'interfaces, notamment dans la conception d'interfaces écologiques (*Ecological Interface Design* ou EID) que nous avons présentée dans le chapitre II. Les travaux de LEE ET AL. (2006) dans la conduite automobile en sont un exemple. Les auteurs ont mis en évidence que l'utilisation de la CWA dans la conception d'interface, améliorait le comportement des participants dans des situations de changement de voie. En effet, grâce à ce type d'interface, les participants adaptaient en général mieux leur vitesse.

V. Conclusion

Ce chapitre montre que, pour favoriser la confiance de l'agent humain en la voiture autonome et ainsi reprendre correctement le contrôle en manuel dans des voitures autonomes de niveau 4, l'agent humain doit comprendre leur fonctionnement. Si le chapitre II a mis en évidence l'importance de développer et de maintenir une *Situation Awareness* chez l'agent humain - notamment pour qu'il puisse reprendre convenablement la main lorsque cela est requis - nous avons montré aussi dans ce chapitre l'importance de communiquer à l'agent humain la logique de fonctionnement de l'automatisme afin de le rendre prédictible et favoriser la confiance chez l'agent humain. Nous avons également introduit et développé une notion clef qui est celle de la transparence qui vise à rendre le fonctionnement de l'automate compréhensible.

Au terme de ce chapitre, il apparaît clairement que nous aurons à prendre en compte la transparence dans la conception de l'interface humain – véhicule autonome. Nous avons choisi d'utiliser le modèle de LYONS (2013) auquel nous associerons les quatre fonctions de traitement de l'information (PARASURAMAN ET AL., 2000) nécessaires à la réalisation de la tâche de conduite : « acquisition de l'information », « analyse de l'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action ». Pour définir les informations nécessaires à l'agent humain et ainsi soutenir la transparence de l'interface, nous avons choisi d'utiliser la *Cognitive Work Analysis* pour sa caractéristique formative et son approche par contraintes, mais également parce qu'elle permet d'adresser le problème de conception d'interface écologique présenté au chapitre II.

Si l'intérêt de la transparence semble évident, il reste à répondre à deux problématiques principales.

- **Problématique 1** : Comment adapter le concept et les principes généraux de transparence pour pouvoir l'appliquer au domaine des véhicules fortement automatisés ?
- **Problématique 2 :** Quel niveau de transparence faut-il mettre en œuvre pour une voiture automatisée ?

C'est à ces deux problématiques que nous répondrons dans la deuxième partie de ce manuscrit.

Conclusion de la partie I

Comme nous l'avons présenté dans le chapitre I, il est possible de définir différents niveaux d'automatisation en fonction de plusieurs catégorisations qu'on appelle aussi « taxonomies ». Si certaines de ces taxonomies sont transversales à plusieurs domaines, d'autres par contre sont spécifiques à la conduite automobile telles que la taxonomie de la *Society of Automotive Engineers* (SAE). Cette taxonomie définit l'automatisation en six niveaux dans lesquels l'agent humain passe d'un niveau où il gère totalement la tâche de conduite automobile (niveau 0) à un niveau où il la délègue entièrement aux automatismes (niveau 5). Dans nos travaux, nous utilisons la taxonomie de la SAE et nous nous focalisons sur le niveau d'automatisation 4. À ce niveau, les composants d'automatisation fonctionnent de façon à libérer le conducteur de la tâche de supervision. Ils lui permettent de céder le contrôle complet du véhicule et de toutes ses fonctions principales, et ce dans certaines conditions de circulation (principalement sur autoroute) et météorologiques. Le véhicule peut effectuer seul des dépassements, se rabattre, changer de direction alors que le conducteur se consacre à des tâches annexes comme la lecture. Cependant, le conducteur doit être également en mesure de reprendre le contrôle du véhicule dans un temps acceptable sur demande du système. La conception de ces véhicules fortement automatisés pose différentes questions de recherche (TRIMBLE ET AL., 2014) :

- Les conducteurs peuvent-ils interagir en toute sécurité avec ces véhicules ?
- Quels sont les risques associés à la réalisation et à l'interruption de tâches secondaires (utilisation d'appareils électroniques notamment) ?
- Quelles sont les stratégies de reprise en main (transition humain - automatismes et automatismes - humain) les plus efficaces ?
- Comment les conducteurs s'engagent-ils, se désengagent-ils, se réengagent-ils dans les tâches de conduite en réponse aux différents états du système automatique ?
- Quels sont les concepts d'interface les plus pertinents, susceptibles de garantir un niveau de sécurité optimal ?

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse visent à apporter des éléments de réponse à la dernière question, en considérant la notion d'acceptabilité pour que le système soit effectivement utilisé.

Une des particularités des véhicules fortement automatisés réside dans le fait qu'ils proposent deux modes de fonctionnement : manuel et automatique. Le passage entre ces deux modes se fait lors de phases de transition : il peut s'agir de la transition du mode autonome au mode manuel, ou de la transition du mode manuel au mode autonome. L'allocation des fonctions entre humain et machine est donc dynamique. L'allocation dynamique des fonctions a été décrite comme une forme d'automatisation qui permet des changements dans l'attribution des fonctions basés sur différents états du système homme-machine (HILBURN, JORNA, BYRNE & PARASURAMAN, 1997). COOK ET AL. (1999) précisent que la redistribution peut se faire suivant l'état de l'opérateur (en considérant sa charge de travail par exemple) ou de conditions externes (changements de l'environnement, incident). Dans le cas des véhicules autonomes de niveau SAE 4, elle dépend – comme nous l'avons déjà souligné - des conditions de l'environnement et de l'infrastructure routière, ainsi que des commandes du conducteur. L'allocation dynamique des fonctions pose un certain nombre de questions listées par KABER, RILEY, TAN ET ENDSLEY. (2001) ou encore par KABER ET ENDSLEY (2004) et rappelées dans la thèse de JUDAS (2015). Nous retiendrons la question suivante :

Comment concevoir une interface qui facilite la compréhension et l'acceptabilité de la voiture autonome et a fortiori améliorer la qualité de la transition entre le mode autonome et le mode manuel ? S'il passe en mode manuel, l'opérateur humain (ici le conducteur) a besoin de bien comprendre les états dans lesquels se trouvent les systèmes qui ont été contrôlés par les automatismes. Pour pouvoir répondre à cette question, nous avons

exploré plusieurs modèles et, principalement, les modèles de coopération homme – machine, de *Situation Awareness*, de confiance et de transparence. Les véhicules de niveau SAE 4 supposent une coopération entre l'humain et le système, selon le sens donné à ce terme par HOC (2001), car ils poursuivent tous deux le même objectif et parce qu'il y a interférence au moment du changement de mode. La coopération repose sur l'élaboration et le maintien d'une représentation partagée. L'agent humain et l'automate doivent, en effet, avoir une compréhension partagée de la situation mais doivent également comprendre le fonctionnement de leur partenaire. Le terme de situation est à comprendre au sens large ; la situation englobant l'environnement extérieur mais également l'état du système. Pour aboutir à cette compréhension partagée, il est nécessaire de communiquer. Nous avons proposé de penser la communication en termes de transparence et à l'aide de la Réalité Augmentée.

La Réalité Augmentée consiste à ajouter des éléments virtuels sur des objets réels (AZUMA, 1997). La plus-value de cette technologie a déjà été prouvée par plusieurs travaux que ce soit en conduite manuelle ou en conduite autonome (cf. chapitre II). Si les dispositifs permettant de mettre en œuvre la RA sont nombreux, nous avons choisi d'utiliser un afficheur tête haute ou *Head Up Display* (HUD) présent dans les voitures de dernière génération, pour les avantages qu'il offre : limitation de parallaxe de mouvement et absence de gêne physique. Dans nos travaux, nous faisons le postulat que les annotations de Réalité Augmentée aideront le conducteur à se représenter la situation.

La compréhension du fonctionnement de l'automatisation par l'agent humain est nécessaire au développement d'une confiance appropriée en l'automatisme ; confiance qui est, elle-même, un élément nécessaire pour que l'automate soit correctement utilisé. Un niveau de confiance approprié se situe entre la sous-confiance et la sur-confiance qui engendrent respectivement une non-utilisation et une mauvaise utilisation de l'automatisation. La formation et l'information apportées au conducteur peuvent faciliter la compréhension du fonctionnement de l'automate. Mais l'IHM peut également être conçue de manière à rendre le fonctionnement de l'automatisation prévisible et compréhensible par l'agent humain. On parle alors de « transparence ». Parmi les modèles de la transparence, nous avons choisi d'utiliser le modèle de LYONS (2013). Il se décompose en plusieurs sous-modèles qui incluent le modèle de l'objectif général du système, le modèle de la tâche, le modèle de l'environnement, le modèle analytique, le modèle de la coopération et le modèle de l'agent humain. Excepté pour le dernier sous-modèle, nous nous proposons de définir des principes de transparence propres à la conduite autonome. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre III, nous établirons une correspondance entre les principes et les fonctions de traitement de l'information définies par PARASURAMAN ET AL. (2000) : « prise de l'information », « analyse de l'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action. » pour faire écho au référentiel commun présenté au chapitre I. Nous nous proposons de vérifier expérimentalement la validité de chaque principe de transparence pour déterminer le niveau de transparence suffisant – i.e. permettant de favoriser la compréhension que l'agent humain a de l'automate ainsi que sa *Situation Awareness* - , tout en veillant à minimiser le nombre d'informations présentées afin d'éviter toute surcharge informationnelle du conducteur.

La mise en œuvre de ces principes se traduira par l'affichage d'informations relatives à l'intention du système, à la tâche en cours, aux principes d'analyse qu'il utilise, à la façon dont il perçoit et comprend son environnement. Pour définir les informations relatives à l'environnement, nous avons utilisé la méthodologie *Cognitive Work Analysis* qui a l'avantage de présenter les contraintes de l'environnement de travail, suivant une démarche écologique. Par ailleurs, cette méthodologie a déjà été utilisée dans d'autres travaux de conception, notamment en conduite automobile (cf. chapitre III). Elle comprend plusieurs étapes : l'analyse du domaine

de travail *(Work Domain Analysis* ou WDA*)*, l'analyse de la tâche de contrôle *(Control Task Analysis* ou ConTA*)*, l'analyse de l'Organisation Sociale *(Social Organisation and Cooperation Analysis* ou SOCA*)*, l'analyse des stratégies *(Strategies Analysis* ou StrA*)* et l'analyse des compétences des agents *(Worker Competencies Analysis* ou WCA*)*. Dans le cadre la conception d'IHM, les deux premières étapes apportent des éléments essentiels ; la WDA permet d'identifier les contraintes du domaine de travail qui doivent être rendues visibles (BENNETT & FLACH, 2011) alors que l'analyse de la tâche permet d'identifier les signaux et signes qui seront utilisés dans le cadre des processus cognitifs mis en œuvre de façon automatique (skill-based) ou contrôlée (rule-based). Dans le cadre de notre travail, nous proposerons de modéliser la tâche de changement de voie pour identifier les signaux et les signes dont un conducteur a besoin. Notre attention se portera sur la manœuvre de changement de voie parce qu'elle permet de confronter le conducteur à des comportements complexes et variés de l'automate, permettant ainsi de tester ces principes de transparence.

En résumé, nous visons la conception d'une IHM présentant un niveau de transparence suffisant pour une voiture autonome de niveau 4 selon la taxonomie de la SAE. Il faudra définir le les informations à communiquer à l'agent humain pour qu'il comprenne les comportements de la voiture autonome et se représente correctement l'environnement routier. Ces informations devront être pertinentes au regard de la tâche ; il faut éviter à la fois la surcharge et la sous-charge informationnelle. Dans la deuxième partie de ce manuscrit, nous passerons donc de la théorie à la pratique par une définition des principes de transparence applicables à la conduite automobile et par la spécification de différentes IHM - correspondant à des niveaux de transparence plus ou moins élevés - permettant de valider ou invalider les principes retenus. Chacune de ces IHM sera ensuite évaluée au cours d'une validation expérimentale dont nous présenterons le protocole et les résultats dans la dernière partie de ce manuscrit.

Partie II
PRISE EN COMPTE DE LA TRANSPARENCE DANS LA CONCEPTION D'UNE INTERFACE

Introduction de la partie II

La première partie du manuscrit nous a permis d'élaborer une problématique de recherche pour les véhicules autonomes de niveau SAE 4. Ce niveau d'automatisation est caractérisé par le fait que le conducteur se trouve généralement hors de la boucle de contrôle lorsque le véhicule est en mode autonome. Nous avons montré dans ce contexte que le concept de *Situation Awareness* (ENDSLEY, 1995) devait être intégré dans notre démarche de recherche. En effet, il est absolument nécessaire, pour que le conducteur puisse reprendre la main en mode manuel en toute sécurité, qu'il soit capable de percevoir, comprendre et interpréter correctement son environnement. Nous pensons de plus que cette perception des éléments de l'environnement routier doit être couplée à une compréhension correcte du comportement même de la voiture autonome pour favoriser une transition fluide du mode autonome vers le mode manuel.

Nous avons donc accordé une attention particulière à la manière dont l'interface pouvait favoriser cette double perception/compréhension chez l'agent humain en mode autonome. De plus, dans une optique d'acceptabilité de la voiture autonome et de calibration appropriée de la confiance de l'agent humain envers elle, nous avons orienté notre revue de la littérature vers le concept de transparence. Pour concevoir une interface « transparente », il convient d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- Quels éléments faut-il afficher ?
- Quand faut-il les afficher ?
- Comment faut-il les afficher ?

Les auteurs qui ont défini les dimensions de la transparence d'un système automatisé ont cherché à opérationnaliser leurs modèles dans des contextes applicatifs différents. LYONS ET AL. (2017) ont testé par exemple, trois niveaux de transparence pour un système d'aide aux atterrissages d'urgence dans le domaine de l'aviation commerciale ; au niveau le plus élevé, le système délivrait des recommandations et les explicitait. Reposant sur le modèle de la SA d'Endsley, le modèle SAT (*SA-based Agent Transparency*) développé par CHEN ET AL. (2014) propose quant à lui de fournir à l'agent humain des informations relatives aux buts, intentions et actions de l'agent autonome (au premier niveau), à son processus de raisonnement (deuxième niveau) ainsi qu'à son état futur (au troisième niveau). Ces auteurs stipulent qu'il n'est pas toujours nécessaire de communiquer les informations concernant l'intégralité des trois niveaux et que le niveau optimal de transparence dépend du contexte. MERCADO ET AL. (2016) ont testé les effets de différentes configurations de transparence dans le domaine de la supervision d'une flotte de véhicules autonomes. Enfin, SELKOWITZ, LAKHMANI, CHEN ET BOYCE (2015) ont également utilisé le modèle SAT dans un contexte de supervision d'un robot se déplaçant de façon autonome dans un environnement urbain.

Les modèles de Lyons et de Chen définissent des classes d'informations à afficher sans réellement préciser leurs contenus. De plus, ces modèles ne sont pas associés à des méthodologies qui permettraient, dans un domaine d'application donné, d'instancier chacune de ces classes puis de définir la forme des informations délivrées. La question de la forme des informations est abordée en partie dans l'article de MERCATO ET AL. (IBIDEM) où les auteurs proposent de rendre les symboles plus larges pour rendre plus perceptible des informations plus importantes dans un contexte donné. Par exemple, le symbole associé à la voiture la plus rapide est plus large que les symboles associés aux autres voitures. Comme le soulignent OSOSKY ET AL. (2014), cette question est pourtant cruciale. En outre, OSOSKY ET AL. (2014) ont également repris les principes de conception des interfaces écologiques. KILGORE ET VOSHELL (2014) ont adopté la méthodologie CWA et les principes de l'EID (*Ecological Interface Design*) pour faciliter la supervision d'une flotte de 5 véhicules autonomes en rendant leurs comportements « transparents ». Cependant, aucun de ces derniers auteurs ne cherchait à opérationnaliser un modèle de transparence particulier.

L'objectif de la partie II est de faire le lien entre ces deux approches : une approche théorique au travers de modèles d'une part, et une approche plus pratique au travers la mise en œuvre de la méthodologie CWA d'autre part. Ce lien a pour but d'apporter des réponses concrètes aux questions que nous avons soulevées et qui concernent i) la définition du contenu de l'interface (quoi ?), ii) la temporalité de l'affichage (quand ?) et iii) la forme des informations affichées (comment ?). Nous apporterons des réponses à ces questions, dans le cadre de la supervision d'un véhicule autonome de niveau SAE 4 par un opérateur humain, en parcourant les différentes étapes de notre démarche présentée Figure 27 :

- Dans les étapes 1 et 2 qui correspondent respectivement à l'opérationnalisation des principes de transparence et à l'application de la *Cognitive Work Analysis*, nous répondrons à la question 1, c'est-à-dire celle relative au « quoi ? ».
- Dans l'étape 3, qui correspond à la spécification de l'automate, nous répondrons à la question 2 du « quand ? » pour préciser les moments d'affichage des informations en fonction des situations de trafic. Un aspect important à ce niveau est de s'assurer dans le cas de notre étude que le système autonome utilisé pour nos expérimentations sur simulateur est en mesure de fournir les informations identifiées, et le modifier le cas échéant.
- L'étape 4, la spécification des IHM, vise à apporter quant à elle, des éléments de réponse à la dernière question, celle du « Comment ? ».
- Enfin la dernière étape, consistera à tester l'interface ainsi conçue au moyen d'une expérimentation : il s'agit de la validation expérimentale.

Les étapes 1 à 4 seront présentées dans cette deuxième partie qui comprend deux chapitres. Les étapes 1 et 2 le seront dans chapitre IV qui porte sur l'opérationnalisation des principes de transparence que nous avons définis à partir du modèle de LYONS (2013) et sur la définition des informations propres à chaque principe de transparence grâce à la mise en œuvre de la CWA. Le chapitre V correspondant aux étapes 3 et 4 présentera l'architecture fonctionnelle du simulateur qui sera utilisé dans le cadre de l'expérimentation menée pour valider nos concepts ; une attention particulière sera accordée à la façon dont l'algorithme et les règles ont été construits pour permettre l'affichage des informations au moment opportun. Dans ce même chapitre, nous exposerons également les étapes des séances de créativité qui ont été organisées pour déterminer la représentation graphique des informations identifiées ainsi que le mode d'affichage (avec ou sans Réalité Augmentée).

L'étape 5 sera quant à elle exposée dans une troisième et dernière partie du manuscrit.

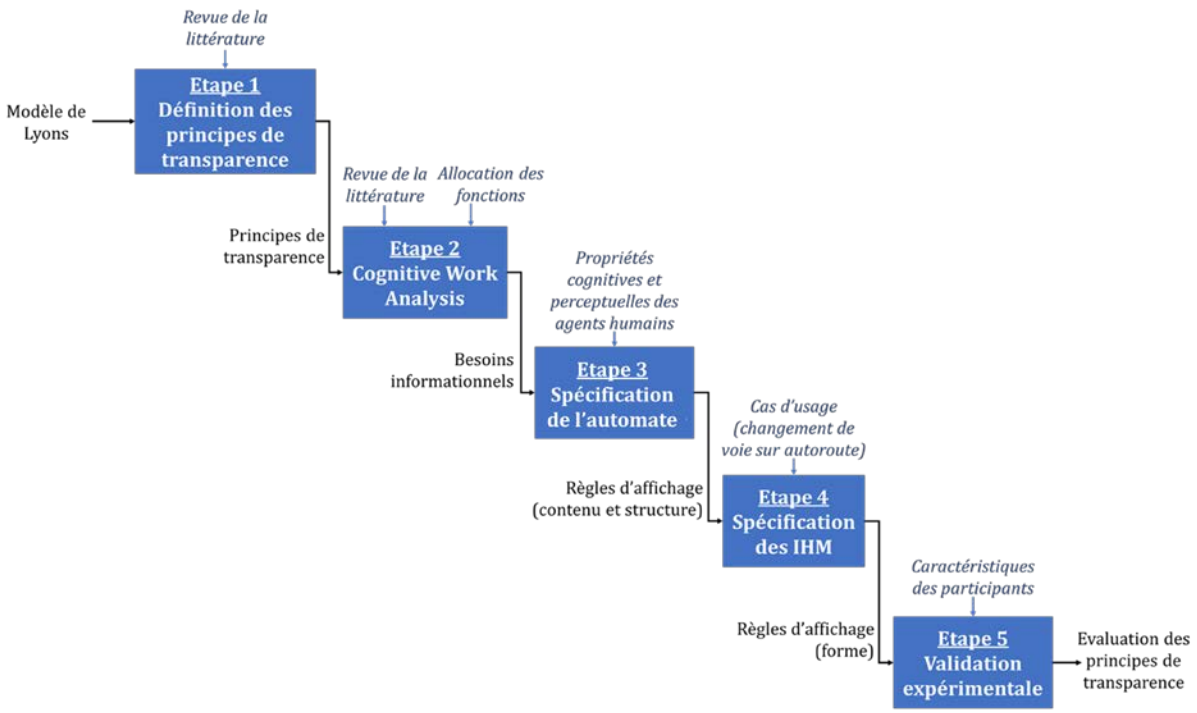


Figure 27 : Démarche de recherche utilisée

Chapitre IV. **Définition des principes de transparence et application de la *Cognitive Work Analysis***

I. Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons mis en évidence l'importance de la *Situation Awareness* et du concept de transparence dans la conception d'interfaces dans un contexte d'utilisation d'un automate en environnement dynamique. L'accent a été mis sur la voiture autonome qui constitue notre objet d'étude. Parmi les modèles de transparence, nous avons présenté le modèle de LYONS (2013), choisi comme modèle cadre de transparence dans nos travaux. Ce dernier a été développé pour déterminer quelles informations un automate doit communiquer à un (des) agent(s) humain(s) pour qu'il leur apparaisse plus « transparent ». Il comprend différents sous-modèles permettant, pour chacun d'entre eux, de cerner les éléments génériques qu'il conviendrait de présenter pour aider l'agent humain à comprendre, en ce qui concerne l'automate, i) son fonctionnement avec le modèle de l'objectif général ; ii) les tâches en cours de réalisation avec le modèle de la tâche, iii) les éléments qu'il a perçus avec le modèle de l'environnement, iv) la façon dont il réalise les tâches avec le modèle analytique, v) la répartition des tâches entre l'automate et l'agent humain avec le modèle de coopération et vi) son analyse de l'agent humain avec le modèle de l'agent humain. À partir de ces différents modèles, et dans le contexte de l'utilisation d'une voiture autonome, nous avons défini un certain nombre de principes de transparence. Pour déterminer de manière précise les données correspondant à chaque principe, nous avons mené ensuite une analyse du travail cognitif encore appelée *Cognitive Work Analysis* (CWA) dont les fondements ont été présentés au chapitre III de ce manuscrit.

Ce chapitre IV comprend trois sections principales. Nous présenterons les principes de transparence que nous avons définis à partir du modèle de LYONS (2013) dans la section II. Les résultats de la *Cognitive Work Analysis* seront exposés dans la section III. Dans la section IV, nous mettrons en relation les principes de transparence définis et les résultats de la CWA.

II. Les principes de transparence

Comme nous l'avons mentionné dans la première partie de ce manuscrit, le courant qui prône la Coopération Homme-Machine considère que l'agent humain et l'agent technique doivent fonctionner en équipe, c'est-à-dire en coopérant pour avoir la meilleure performance possible, tout en facilitant le travail de l'autre. Un référentiel commun doit donc être maintenu et /ou élaboré entre ces agents, ce référentiel pouvant être supporté par une IHM, qui correspond à ce qui est appelé espace de travail commun (ETC). Cet ETC peut comprendre plusieurs attributs notamment (DEBERNARD, 2006) :

- La formulation d'informations qui découlent des activités d'élaboration de l'information,
- La formulation des problèmes qui découlent des activités d'identification,
- La formulation de stratégies qui découlent des activités de prise de décision schématique.,
- La formulation des solutions qui découlent des activités de prise de décision précise,
- La formulation des instructions qui découlent des activités d'implémentation de solutions.

Dans le modèle de LYONS (2013), il n'y a pas de corrélation clairement explicitée entre chaque sous-modèle et les quatre fonctions du traitement de l'information de PARASURAMAN ET AL. (2000) ou les attributs de l'espace de travail commun que nous venons de rappeler. Ainsi, dans nos travaux, des liens directs entre les principes de transparence issus du modèle de Lyons et ces fonctions seront établis pour alimenter cet espace.

Par ailleurs, pour rendre l'ensemble de la démarche consistante et pour tenir compte de notre domaine d'étude qu'est la conduite automobile, nous établirons quand ce sera possible, des relations entre chaque principe et le modèle de MICHON (1985). Nous avons montré au chapitre II que ce dernier définit la conduite automobile selon les trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel. Pour avoir une matrice d'analyse, nous avons donc couplé les fonctions de PARASURAMAN ET AL. (2000) et les niveaux de MICHON (1985). Le Tableau 8 présente cette matrice que nous avons appelée matrice TINC (ou *IPLC-based matrix* pour *Information Processing and Level of Control-based matrix*), c'est-à-dire matrice basée sur le Traitement de l'Information et des Niveaux de Contrôle.

Tableau 8:Matrice TINC

	P.I	A.I	P.D	I.A
S				
T				
O				

Dans le Tableau 8, les lettres S, T et O renvoient respectivement aux niveaux stratégique, tactique et opérationnel. Quant aux sigles P.I, A.I, P.D et I.A, ils renvoient respectivement aux fonctions « Prise d'information », « Analyse de l'information », « Prise de décision » et « Implémentation de l'action ». Nous avons expressément choisi de parler de « Prise de l'Information » en lieu et place « d'Acquisition de l'Information » pour éviter d'avoir deux fois le sigle A.I qui aurait renvoyé simultanément à « Analyse d'information » et « Acquisition de l'information ».

Dans les paragraphes suivants, nous présentons les différents principes que nous avons définis sur la base du modèle de Lyons, en lien avec le projet LRA où les fonctions principales du de l'automate ont consisté à réaliser le changement de voie et à contrôler la trajectoire longitudinale et latérale du véhicule autonome en tenant compte du contexte et notamment du trafic. Pour chacun d'entre eux, nous établirons, lorsque ce sera possible le lien avec la matrice TINC. Les principes que nous allons énoncer sont généraux et sont corrélés aux trois niveaux de contrôle de Michon. Cependant, dans le projet LRA, aucune attention particulière n'a été accordé au niveau stratégique qui se trouve en dehors du champ d'investigation du projet.

II.1 Les principes de transparence issus du modèle de l'objectif général

Ce modèle renvoie au but pour lequel le robot a été conçu, ou encore à son objectif global. En d'autres termes, dans ce modèle, il est question de communiquer à l'agent humain la « raison d'être du système ». En conduite automobile autonome, il s'agit pour l'agent humain de savoir ce que la voiture autonome est en mesure de faire et dans quel contexte. Dans le cadre du projet LRA, les éléments suivants ont été spécifiés pour caractériser le véhicule autonome étudié :

- Le niveau 4 d'automatisation est un niveau d'automatisation limité.
- La voiture donne la possibilité à l'agent humain de déléguer toutes les fonctions de conduite. Ces fonctions étant critiques (en termes de sécurité), le mode autonome ne peut être engagé que sous certaines conditions de trafic et d'environnement. Dans le cadre du projet LRA, la voiture peut être en mode autonome si les marquages routiers sont très visibles et que les conditions atmosphériques soient clémentes (pas de pluies diluviennes, ou de neige).
- Le conducteur peut compter sur l'automate, d'une part pour surveiller les changements des conditions d'utilisation du mode autonome, et d'autre part pour lui demander de reprendre le contrôle quand il atteint les limites de ses capacités (retour en mode manuel).
- Le conducteur doit être disponible pour réaliser des contrôles occasionnels sachant qu'un temps confortable de transition lui sera accordé avant le retour en mode manuel. GOLD, DAMBÖCK , LORENZ ET BENGLER (2014) considèrent en effet que 5s sont insuffisantes pour la reprise en main. DAMBLÖCK, BENGLER, FARID ET TÖNERT, (2012), quant à eux, considèrent que 8s constituent un temps suffisant. Dans le projet LRA, le temps de reprise en main adopté est de 10s.
- La voiture est conçue pour assurer en toute sécurité les tâches de conduite et les manœuvres qui en découlent durant le mode autonome.

Il est essentiel que l'agent humain connaisse précisément toutes ces conditions d'utilisation avant de pouvoir engager le mode autonome. De même, si l'agent humain n'est pas informé que la voiture autonome est en capacité de réaliser des changements de voie en toute sécurité, il pourrait être surpris et désactiver le mode autonome. De manière générique, nous avons donc défini le **principe O1** qui stipule que

> *« Le conducteur doit savoir quel est le niveau maximal d'autonomie de la voiture ainsi que les conditions d'utilisation de ce niveau d'autonomie. Ces conditions doivent être clairement identifiables pour que le conducteur fasse aisément le lien entre celles-ci et l'activation du mode autonome ».*

Ce principe est en dehors de la matrice TINC.

Il est important de relever que toutes les voitures autonomes, à même niveau[29] d'automatisation, ne sont pas identiques. En d'autres termes, deux voitures de niveau SAE 4 par exemple, ne réalisent pas nécessairement un changement de voie au niveau tactique. Dans le projet LRA, l'automatisation concerne uniquement les niveaux tactique et opérationnel. Au niveau tactique, la voiture fait le choix de suivre la voie la plus à droite pour respecter les règles formelles de conduite définies par le code de la route. Elle peut réaliser un changement de voie pour respecter sa consigne de vitesse si un véhicule plus lent est présent et si les variables contextuelles (espace d'insertion par exemple) sont propices à ce changement. Le suivi de trajet défini au niveau stratégique peut conduire aussi à un changement de voie (s'il implique une sortie d'autoroute par exemple). En résumé, le conducteur doit savoir que la voiture autonome effectue :

- Un changement de voie vers la droite pour rejoindre la voie de circulation « par défaut » qui est la voie de droite.
- Un changement de voie vers la gauche si un véhicule lent empêche un maintien de la consigne de vitesse et si la voie de gauche est disponible, ou enfin si cela est nécessaire compte tenu du niveau supérieur qu'est le niveau stratégique (suivi d'un itinéraire).
- Un suivi de voie par défaut.

Compte tenu de ce qui précède, nous pouvons énoncer le **principe O2** qui stipule que

« Le conducteur doit savoir quelles sont les tâches que l'automatisation est capable de réaliser, sous quelles conditions elle peut les réaliser, et comment elle les réalise, c'est-à-dire qu'il doit connaître les fonctions générales qui sont allouées à la voiture en mode autonome ».

Ce principe, comme le précédent, ne rentre pas dans la matrice TINC.

De la même façon qu'un agent humain est susceptible de réaliser plusieurs manœuvres à bord de son véhicule, une voiture autonome est également en mesure de le faire. Il est donc nécessaire de connaître les règles d'arbitrage utilisées par la voiture autonome dans des situations où plusieurs manœuvres sont possibles. Par conséquent, le **principe O3** a été défini. Il précise que

« Le conducteur doit connaître la façon dont l'automatisation hiérarchise ses comportements lorsque plusieurs options sont envisageables ».

Comme les deux premiers principes, ce principe est en dehors du champ de la matrice TINC.

Après avoir énoncé les principes de l'objectif général, nous allons énoncer ceux qui sont relatifs au « modèle de la tâche ».

II.2 Les principes de transparence issus du modèle de la tâche

Comme nous l'avons présenté au chapitre III, le modèle de la tâche contient des informations relatives au but du robot à un instant donné. Concrètement, en conduite automobile autonome, l'agent humain doit savoir à un instant donné si le véhicule est en train de réaliser un changement de voie (vers la gauche ou vers la droite) ou un suivi de voie. Cette dimension d'action en cours relève du niveau opérationnel dans le modèle de l'activité de conduite proposé par MICHON (1985) et de la fonction « implémentation de l'action » de

[29] Les niveaux SAE restent très vagues par rapport aux fonctions automatisées

PARASURAMAN ET AL. (2000). Cette manœuvre devra se faire en respectant les règles formelles de conduite. Pour savoir si une règle est respectée, il faut tout d'abord savoir quelle règle doit être respectée. Par exemple, l'agent humain ne peut savoir que la voiture autonome a dépassé une vitesse limite de 90 km/h, que s'il sait que la vitesse limite est effectivement de 90 km/h. En d'autres termes, la fonction « analyse de l'information » à un niveau opérationnel est nécessaire. Par conséquent, nous avons proposé le **principe T1** selon lequel

> *« Dans le mode autonome établi, le conducteur doit être informé que l'automate contrôle la voiture en respectant les règles et pratiques de la conduite en vigueur (prédictibilité du comportement de la voiture). Par ailleurs, le conducteur doit être capable de détecter les actions (changement ou maintien de trajectoire, changements de vitesse) en cours de réalisation par la voiture et les comprendre. »*

Le principe T1 amène donc à présenter au conducteur les informations nécessaires correspondant au niveau opérationnel/analyse de l'information et niveau opérationnel/implémentation de l'action dans la matrice TINC (Tableau 9). Pour les éléments relevant du niveau opérationnel/implémentation de l'action, le conducteur doit savoir que le contrôle latéral et le contrôle longitudinal sont correctement assurés. Ces contrôles constituent les exigences basiques de toute voiture et donc de la voiture autonome en particulier. Étant donné que le suivi de voie constitue le contrôle latéral par défaut d'une voiture, il nous a semblé intéressant de ne représenter en Réalité Augmentée que les changements de voie décidés par l'automate. Cependant, il faut également prendre en considération les modifications de vitesse associées. C'est la raison pour laquelle, à chaque instant, une des neuf situations suivantes déterminées par l'automate sera indiquée au conducteur :

- Suivi de voie avec accélération,
- Suivi de voie avec décélération,
- Suivi de voie avec maintien de la vitesse,
- Changement de voie vers la droite avec accélération,
- Changement de voie vers la droite avec décélération,
- Changement de voie vers la droite avec maintien de la vitesse,
- Changement de voie vers la gauche avec accélération,
- Changement de voie vers la gauche avec décélération,
- Changement de voie vers la gauche avec maintien de la vitesse.

Tableau 9 : Matrice TINC pour le principe T1

	P.I	A.I	P.D	I.A
S				
T				
O				

Le modèle de la tâche stipule aussi que l'agent humain doit être en mesure de percevoir le but (intention) de l'automate et sa progression vers ce but. L'automate doit donc communiquer ses intentions à l'agent humain. Il peut s'agir, en conduite autonome, d'une intention de changement de voie dans un contexte donné, par exemple lorsqu'un véhicule est plus lent devant. Nous avons donc défini le **principe T2** qui stipule que

> *« Dans le mode autonome établi, dans un contexte donné, le conducteur doit être capable de percevoir l'intention de la voiture autonome (la manœuvre qu'elle va réaliser) et comprendre pourquoi cette manœuvre va être réalisée. »*

Ce principe rejoint la recommandation de BILLINGS (1991, P.120) qui indique que « *dans un système homme-machine intelligent, chaque agent doit avoir une connaissance de l'intention des autres agents* ». L'intention relève de la fonction « prise de décision ». Seuls les niveaux stratégique et tactique identifiés par MICHON (1985) sont concernés. Par exemple, on peut évoquer i) le changement de voie pour le niveau tactique et ii) l'itinéraire pour le niveau stratégique. Ainsi, le principe T2 amène à présenter au conducteur les informations, dans la matrice TINC (cf. Tableau 10), qui relèvent de :

1. L'analyse de l'information, au niveau stratégique ;
2. La prise de décision, au niveau stratégique ;
3. L'analyse de l'information, au niveau tactique ;
4. La prise de décision au niveau tactique ;

Dans nos travaux, les informations relatives au niveau stratégique n'ont pas l'objet d'une étude spécifique. Nous avons uniquement indiqué sur un écran spécifique l'itinéraire de la voiture autonome. Nous y reviendrons plus tard.

Tableau 10 : Matrice TINC pour le principe T2

	P.I	A.I	P.D	I.A
S				
T				
O				

En conduite automobile autonome, à la suite d'une modification du contexte, une manœuvre peut interrompre celle qui était en cours de réalisation. Il peut s'agir par exemple d'un changement de voie amorcé par le véhicule autonome, mais à cause d'une voiture arrivant à vive allure sur la voie de gauche, le changement de voie devient impossible, l'espace d'insertion se restreignant. Le changement de voie étant interrompu, il est nécessaire d'en informer le conducteur. Par conséquent, nous avons énoncé le **principe T3** qui précise que

> *« Dans le mode autonome établi, le conducteur doit être informé de toute manœuvre pouvant en interrompre une autre en cours de réalisation (Changement de plan). »*

Ce principe met donc en évidence les éléments relevant de la prise de décision et de l'analyse de l'information au niveau tactique dans la matrice TINC (cf. Tableau 11). Tandis que les premiers éléments mettent en évidence la décision prise à cause de l'événement perturbateur, les deuxièmes permettent de justifier cette décision.

Tableau 11 : Matrice TINC pour le principe T3

	P.I	A.I	P.D	I.A
S				
T				
O				

II.3 Les principes de transparence issus du modèle analytique

Le modèle analytique vise à communiquer à l'agent humain les « mécanismes de raisonnement » utilisés par le robot pour décider (cf. chapitre III). Le système autonome doit être en mesure d'expliquer les stratégies de prise de décision si cela lui est demandé par l'agent humain. En conduite automobile, l'agent humain doit savoir comment le changement de voie doit se faire, et notamment connaître les contraintes qui sont prises en compte comme par exemple les autres véhicules (i.e. le trafic). Par conséquent, le **principe A1** stipule que

> *« Dans le mode autonome établi, le conducteur doit savoir comment chaque manœuvre est réalisée ».*

Les informations à afficher au conducteur correspondant au principe A1 relève de la « prise de décision » dans la matrice TINC tant au niveau tactique qu'opérationnel, (Tableau 12). Le principe A1 fait écho à celui de BILLINGS (1996, P138) qui stipule que **«** *le système autonome qui contrôle le trafic aérien doit réaliser des tâches de façon compréhensible par les contrôleurs. »*

Tableau 12: Matrice TINC pour le principe A1

	P.I	A.I	P.D	I.A
S				
T			■	
O			■	

Le principe A1 est en rapport avec la façon dont l'automate va réaliser une manœuvre dans une situation où il n'y a pas de contrainte particulière. Cependant, des contraintes peuvent être présentes dans certains cas. Par exemple, une voiture qui souhaite s'insérer devant la voiture autonome doit être clairement signalée surtout si elle est dangereuse. Il convient également de signaler toute voiture effectuant un changement de voie vers la voie dans laquelle la voiture autonome avait l'intention se déplacer. C'est la raison pour laquelle nous avons énoncé le **principe A2**, qui porte sur la mise en évidence d'un danger et selon lequel

> *« Toute menace ou danger doivent être indiqués de façon spécifique ».*

Ce principe A2 fait intervenir les éléments relevant du niveau tactique/analyse de l'information dans la matrice TINC (Tableau 13).

Tableau 13 : Matrice TINC pour le principe A2

	P.I	A.I	P.D	I.A
S				
T		■		
O				

Les principes de transparence ayant été énoncés pour le modèle analytique, nous allons énoncer ceux qui sont relatifs au « modèle de l'environnement ».

II.4 Les principes de transparence issus du modèle de l'environnement

Comme nous l'avons mentionné au chapitre III, le robot doit communiquer à l'agent humain la compréhension qu'il a de la topographie des lieux, des conditions météorologiques ainsi que des contraintes temporelles dans un environnement particulier.

Dans une voiture autonome, les capteurs constituent la première interface avec l'environnement extérieur. Ce sont eux qui détectent les entités dynamiques ou statiques qui s'y trouvent. Les capteurs fournissent les données d'entrée qui vont engendrer des comportements spécifiques de la voiture autonome que l'agent humain doit comprendre. L'accès à ces informations par le conducteur lui permet de vérifier que les capteurs fonctionnent correctement et qu'il a la même représentation de l'environnement que le véhicule. Le **principe E1** indique que

> *« Dans le mode autonome établi, le conducteur doit avoir une perception suffisante de ce que la voiture autonome perçoit pour effectuer ses analyses et prendre ses décisions. Il doit être assuré que la voiture autonome dispose des informations nécessaires à la prise de décision ».*

Les capteurs fournissent des informations de bas niveau tels que les bords de voie, les autres véhicules, les obstacles sur la route ; elles relèvent de la prise d'informations au niveau opérationnel. Certains panneaux de signalisation comme les panneaux de limitation de vitesse relèvent de la prise d'informations au niveau tactique (cf. Tableau 14). La prise d'informations au niveau stratégique qui permet d'identifier, par exemple, les itinéraires congestionnés, peut amener l'automate à proposer un itinéraire alternatif pour éviter les bouchons.

Tableau 14: Matrice TINC pour le principe E1

	P.I	A.I	P.D	I.A
S				
T				
O				

Si les capteurs sont en charge de la détection des objets de l'environnement routier, cette possibilité de détection n'est pas identique d'un capteur à l'autre. En effet, les capteurs ont des portées limitées différentes. Par exemple, certains radars peuvent détecter à 150 m tandis que d'autres le peuvent à 100 m. Dans le cas où un radar de la voiture autonome ne détecte un véhicule qu'à 50 m et qu'il y a un véhicule lent devant présent à plus de 50m, l'indication de la limite du radar peut aider l'agent humain à comprendre pourquoi l'intention de changement de voie n'est pas encore signalée. Réciproquement, l'indication de la limite de ce radar peut aider l'agent humain à se rassurer quant au fait qu'une voiture située à 30 m ou à une distance inférieure de la voiture autonome, a bien été perçue par l'automate. Nous avons donc énoncé le **principe E2** qui précise qu'

> *« Il est important que le conducteur connaisse les limites des capteurs du véhicule, sachant qu'il peut lui-même voir des informations qui n'ont pas été perçues par ceux-ci. »*

Ce principe met en évidence les éléments relevant du niveau opérationnel/Prise d'informations dans la matrice TINC, Tableau 15.

Tableau 15: Matrice TINC pour le principe E2

	P.I	A.I	P.D	I.A
S				
T				
O				

Nous venons de présenter les principes relatifs au modèle de l'environnement. Les lignes suivantes seront dédiées à la présentation des principes issus du « modèle de la coopération ».

II.5 Les principes de transparence issus du modèle de la coopération

LYONS (2013) stipule que chaque agent doit clairement identifier les missions qui lui sont assignées. Dans une voiture de niveau 4 SAE, deux modes de conduite sont possibles : le mode autonome dans lequel l'automate est en charge de la conduite et le mode manuel dans lequel l'agent humain assure les différents contrôles nécessaires. Il est donc primordial que l'agent humain sache quel est le mode actif, comme nous l'avons vu au chapitre II. Dans le pire des cas, une confusion de mode pourrait être à l'origine d'un accident. La Figure 28 montre une interface indiquant le mode manuel par M et le mode autonome par A. Nous avons donc énoncé le **principe C1** selon lequel

> *« Le conducteur doit savoir quel est le mode actif à chaque instant pour éviter toute confusion de mode. »*

Ce principe ne peut être traduit dans la matrice TINC.

Figure 28 : Mode manuel M (à gauche) et mode autonome A (à droite) indiqués dans une interface Bosch

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le mode autonome n'est pas disponible à chaque instant dans un véhicule de niveau SAE 4. Cette disponibilité est fortement dépendante par exemple des conditions environnementales et du contexte de conduite. Par conséquent, il y a des tronçons (ou portions de route) où le mode autonome est disponible et d'autres où il ne l'est pas. La Figure 29 présente par exemple une interface qui différencie les tronçons où le mode autonome est disponible en vert, les autres étant en bleu. Nous avons défini le **principe C2** selon lequel

> *« Le conducteur doit savoir quelles sont les portions où le mode autonome ne sera plus disponible afin de pouvoir organiser ses tâches secondaires et préparer la transition du mode autonome vers le mode manuel. »*

Ce principe est lié à la gestion des activités annexes et non à l'activité de conduite. Dans la matrice TINC, les élements relevant de l'analyse de l'information au niveau stratégique sont mis en évidence (Tableau 16).

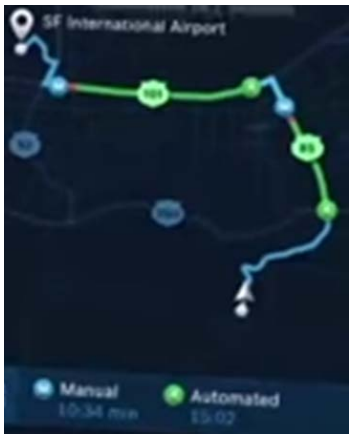


Figure 29 : Tronçons où le mode autonome est disponible sur une interface Bosch

Tableau 16: Matrice TINC pour le principe C2

	P.I	A.I	P.D	I.A
S				
T				
O				

Comme nous venons de le rappeler indirectement, il y a deux phases de transition, du mode manuel au mode autonome, et du mode autonome au mode manuel. Les modalités de réalisation de ces transitions ne sont pas les mêmes d'un constructeur automobile à un autre. Pour ce qui est du passage du mode autonome au mode manuel, certains constructeurs exigent que l'agent humain remette les mains sur le volant et les pieds sur les pédales. D'autres par exemple, exigent uniquement l'appui d'un bouton. Renault exige de l'agent humain qu'il appuie sur un bouton spécifique et qu'il remette ses mains sur le volant. Les différences de modalités font que nous avons énoncé le **principe C3** qui précise que

« Le conducteur doit savoir comment passer d'un mode à l'autre. »

Aucun élément dans la matrice TINC ne permet de traduire ce principe.

Par ailleurs, dans le mode autonome l'agent humain doit aussi savoir dans quel état de fonctionnement est l'automate : correct, dégradé et panne.

- Dans un état de fonctionnement correct, toutes les sous-fonctions de la voiture autonome fonctionnent correctement.
- Dans un état de fonctionnement dégradé, une ou plusieurs sous-fonctions de la voiture ne fonctionnent plus de manière optimale pour la sécurité.
- Dans un état de fonctionnement équivalent à une panne de l'automate, le mode autonome n'est pas disponible parce qu'aucune sous-fonction ne fonctionne de manière optimale. Les conditions environnementales sont néanmoins favorables.

Par conséquent, l'agent humain doit en être informé pour reprendre la main le cas échéant. Nous avons donc défini le **principe C4** qui stipule que

« Le conducteur doit connaître l'état de fonctionnement de la voiture autonome. »

Il n'y a aucun élément dans la matrice TINC qui permet de traduire ce principe. Ce principe fait écho au principe de BILLINGS (1991, P128) selon lequel **«** *les agents humains doivent être en mesure de surveiller le statut du système automatique et le statut des fonctions contrôlées*

par ce système. » Cela doit permettre aux pilotes, selon l'auteur, de reprendre la main en cas de défaillance du pilotage automatique. Il est nécessaire d'indiquer ce statut, car l'absence d'information peut signifier deux choses : il n'y a pas d'information et le système fonctionne correctement ou bien l'ensemble des capteurs qui contrôlent le fonctionnement du système est défaillant.

Les quatre principes de transparence issus du modèle de la coopération ayant été présentés, nous allons aborder maintenant ceux que nous avons extraits du dernier modèle de Lyons : le modèle de l'agent humain.

II.6 Les principes de transparence issus du modèle de l'agent humain

Le modèle de l'agent humain suggère que le robot fait une analyse de l'agent humain du point de vue émotionnel, cognitif et même physique. Le robot pourrait être alors en mesure d'estimer chez l'homme son niveau de stress, de surcharge cognitive ou tout autre état. Nous en avons donc déduit le **principe H1** selon lequel

> *« L'automate doit surveiller l'état du conducteur et le comprendre pour adapter les informations affichées si nécessaire. »*

Il n'y a aucun élément dans la matrice TINC qui permette de traduire ce principe. Par ailleurs, dans le projet LRA, il n'y a pas de driver monitoring permettant d'observer et d'analyser l'agent humain. Par conséquent, le fait que le conducteur soit prêt à reprendre la main est principalement évalué par le fait qu'il a correctement mis ses mains sur le volant et son pied sur la pédale. Dans l'idéal, un ajustement et une priorisation des informations en fonction de la position du regard de l'agent humain ou de sa charge de travail permettrait de rendre l'interface adaptative.

II.7 Synthèse

Nous venons de présenter plusieurs principes que nous avons extraits des sous-modèles formant le modèle de Lyons : modèle de l'objectif général, modèle de la tâche, modèle analytique, modèle de l'environnement, modèle de la coopération et modèle de l'agent humain. Ces principes sont représentés dans la Figure 30.

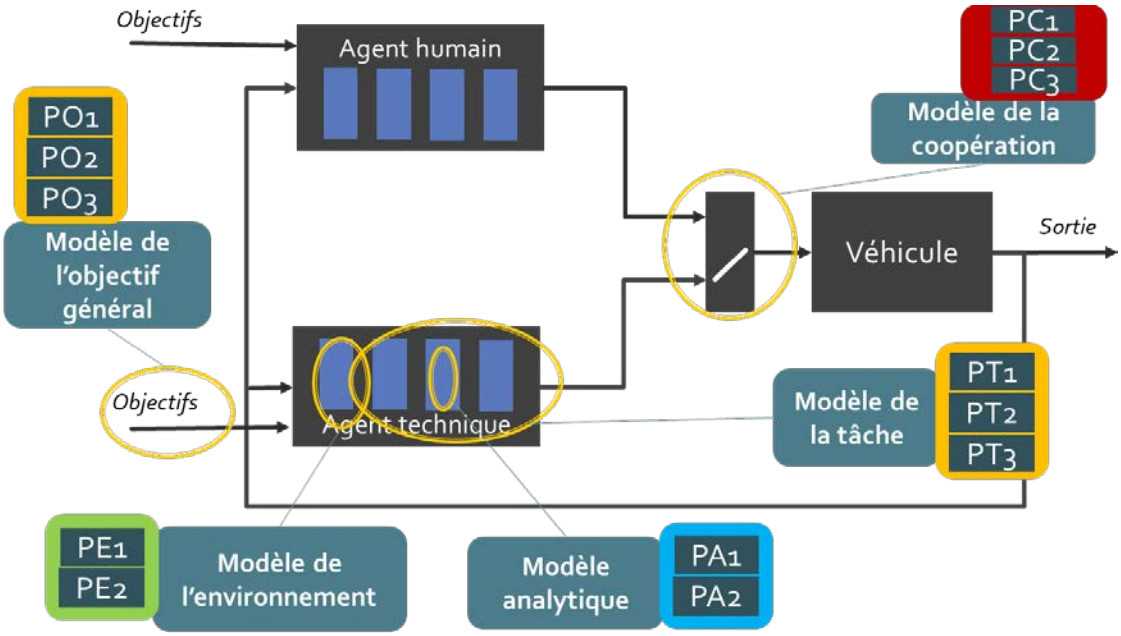


Figure 30 : Les principes de transparences associés au modèle de Lyons

Par ailleurs, nous avons fait une synthèse de ces principes suivant les fonctions du traitement de l'information de PARASURAMAN ET AL. (2000) dans le Tableau 17 et selon les trois niveaux de l'activité de conduite définis par MICHON (1985) dans le Tableau 18. Dans ces tableaux, quand la case est en fond bleu, les éléments relevant du niveau ou de la fonction sont présents ; sinon, la case a un fond blanc.

Tableau 17: Synthèse des principes de transparence selon les quatre fonctions de traitement de l'information de Parasuraman et al. (2000).

Modèles	Principes	P.I	A.I	P.D	I.A
Modèle de l'objectif général	O1				
	O2				
	O3				
Modèle de la tâche	T1				
	T2				
	T3				
Modèle analytique	A1				
	A2				
Modèle de l'environnement	E1				
	E2				
Modèle de la Coopération	C1				
	C2				
	C3				
Modèle de l'agent humain	H1				

Tableau 18: Synthèse des principes de transparence en fonction des niveaux de contrôle de Michon (1985)

Modèles	Principes	S	T	O
Modèle de l'objectif général	O1			
	O2			
	O3			
Modèle de la tâche	T1			

	T2			
	T3			
Modèle analytique	A1			
	A2			
Modèle de l'environnement	E1			
	E2			
Modèle de la Coopération	C1			
	C2			
	C3			
Modèle de l'agent humain	H1			

Le Tableau 17et le Tableau 18 montrent que les principes de transparence que nous avons définis permettent d'aborder chaque niveau de contrôle et chaque fonction. Ces principes couvrent différentes fonctions cognitives et différents niveaux de contrôle en conduite automobile autonome. Ceci reste néanmoins pour le moment générique : les cases en bleu doivent être remplacées par des informations concrètes liées à l'activité de conduite et compréhensibles par l'agent humain. Pour ce faire, nous avons utilisé la *Cognitive Work Analysis* qui nous a permis d'identifier ces informations afin de les organiser sur l'interface de conduite selon des règles d'affichage précises relatives à leur structuration d'une part (ne pas mélanger des informations de niveau de contrôle différents par exemple), et leur représentation graphique d'autre part. Nous présentons les résultats issus de la CWA dans la section suivante.

III. La Cognitive Work Analysis de la voiture autonome

La *Cognitive Work Analysis* (CWA) est une méthodologie classiquement utilisée pour concevoir des interfaces dites écologiques. Ces interfaces ont pour but de rendre visibles les contraintes et les possibilités d'actions existant dans un domaine de travail donné et de faciliter l'utilisation d'un mode de contrôle cognitif peu coûteux basé sur des automatismes (*Skill based*) ou sur des règles (*Rule based*) plutôt que sur des connaissances (*Knowledge based*). Leur but premier est d'aider les opérateurs à faire face à des situations nouvelles dans des systèmes sociotechniques complexes (VICENTE, 2002). Leur développement repose sur trois étapes de la CWA : l'analyse du domaine de travail, l'analyse de la tâche et l'analyse des compétences. Ces étapes, ainsi que les outils de modélisation qui leur sont associés, ont été décrites dans le chapitre III.

Les interfaces écologiques ont été initialement conçues pour soutenir des activités de contrôle de processus (nucléaire, pétrochimie) ou de pilotage. Depuis peu, elles sont également développées pour faciliter la supervision de systèmes autonomes : véhicules sous-marins inhabités (KILGORE & VOSHELL, 2014) mais aussi véhicules autonomes (REVELL ET AL. , 2018). Dans le cadre de la supervision d'un véhicule autonome, ces interfaces ont des visées différentes en fonction de la phase à laquelle elles s'adressent : phase de reprise en main (*Take Over*) ou phase de conduite en mode autonome. Dans le premier cas (documenté par REVELL ET AL., IBID.), elles sont conçues pour faciliter la gestion d'une situation inattendue alors que dans le second (documenté par KILGORE ET VOSHELL, IBID.), elles ont pour objectif premier de faciliter la compréhension du fonctionnement du système et rejoignent ainsi l'objectif de transparence. Notre travail se rapproche de l'étude de Kilgore et Voshell, puisqu'il porte sur la phase de conduite en mode autonome. La phase de reprise en main pour être correctement menée, nécessite que l'agent humain ait une représentation mentale correcte de l'environnement et du comportement de l'agent autonome.

Dans cette section nous mettrons en évidence les analyses du domaine de travail et de la tâche de contrôle que nous avons réalisées.

III.1 L'analyse du domaine de travail avec la Hiérarchie d'Abstraction

L'analyse du domaine de travail a été proposée par RASMUSSEN (1986). À cause de la nature formative de la *Cognitive Work Analysis*, l'analyse du domaine de travail se focalise sur les contraintes liées à la sécurité et à la performance d'un système complexe plutôt que de considérer des scénarios spécifiques (NAIKAR & SANDERSON, 2001). Ces contraintes peuvent être représentées par une hiérarchie d'abstraction (HA) qui comprend cinq niveaux qui sont par ordre décroissant d'abstraction : i) les buts fonctionnels, ii) les valeurs et les mesures de priorité, iii) les fonctions associées aux buts (ou fonctions générales), iv) les processus associés aux objets (ou fonctions physiques) et v) les objets physiques. Les liens entre les niveaux de la hiérarchie d'abstraction expriment des relations « moyens-fins », encore appelées relations « comment-pourquoi ». En effet, les liens entre une fonction-cible et les niveaux d'abstraction inférieurs indiquent comment une fonction est opérationnalisée. À l'inverse, les

liens entre une fonction-cible et les niveaux supérieurs d'abstraction, indiquent pourquoi cette fonction existe.

a) La Hiérarchie d'Abstraction

La hiérarchie d'abstraction a déjà été mise en œuvre dans le domaine de la conduite automobile. Plusieurs travaux ont abordé cette problématique (cf. par exemple l'article de SALMON, REGAN, LENNE, STANTON ET YOUNG, 2007). Les analyses que nous présentons ci-après ont été obtenues après plusieurs itérations. Grâce à de nombreux articles de la littérature tels que JAMIESON, MILLER, HO ET VICENTE. (2004), JENKINS, STANTON, WALKER, SALMON & YOUNG (2008) et des interviews avec les collaborateurs du projet LRA, nous avons identifié les éléments suivants :

- Les **buts fonctionnels** : Il s'agit de la (des) raison(s) d'être du système. Dans le cas de tâche de conduite, nous avons identifié trois buts fonctionnels :
  i. Un transport sur route efficace,
  ii. Un transport sur route en toute sécurité et,
  iii. Un transport sur route confortable.

- **Les valeurs et les mesures de priorité**. Elles correspondent aux principes, priorités et valeurs à suivre pour atteindre les buts fonctionnels. Dans notre cas, il s'agit principalement de :
  i. Respecter l'itinéraire défini,
  ii. Respecter les interdistances entre véhicules,
  iii. Respecter les limitations de vitesse et,
  iv. Éviter les collisions entre véhicules.

- **Les fonctions relatives aux buts.** Encore appelées fonctions générales, elles représentent l'ensemble des fonctions principales que doivent assurer le système. Cinq fonctions générales ont été identifiées :
  i. Identifier les propriétés statiques de l'environnement de conduite,
  ii. Surveiller les manœuvres des véhicules de l'environnement de conduite,
  iii. Identifier les intentions des véhicules de l'environnement de conduite,
  iv. Définir la trajectoire à suivre et,
  v. Adapter le style de la manœuvre à réaliser.

- **Les fonctions relatives aux objets**. Ces fonctions qu'on appelle également fonctions physiques, correspondent aux fonctions qui supportent les fonctions générales. Treize fonctions physiques ont pu être mises en évidence :
  i. Détecter et reconnaître les panneaux de vitesse,
  ii. Détecter et reconnaître les panneaux de direction,
  iii. Vérifier si un ou plusieurs véhicules ont activé leurs clignotants,
  iv. Déterminer la trajectoire des autres véhicules,
  v. Évaluer les différences de distances entre les véhicules,
  vi. Évaluer les différences de vitesses entre les véhicules,
  vii. Mettre en correspondance toutes les données acquises de l'environnement de conduite (fusionner les données)
  viii. Faire un suivi de voie,
  ix. Faire un changement de voie vers la droite,
  x. Faire un changement de voie vers la gauche,

xi. Accélérer,
xii. Freiner et,
xiii. Maintenir la vitesse constante

- **Les objets physiques**. Il s'agit des capteurs, des pièces mécaniques et/ou algorithmes qui assurent les fonctions relatives aux objets. Il s'agit par exemple :
  i. Les capteurs optiques,
  ii. Les systèmes pour la navigation,
  iii. Les systèmes d'analyse,
  iv. Les actionneurs et les systèmes dédiés au contrôle latéral,
  v. Les actionneurs et les systèmes dédiées au contrôle longitudinal.

L'ensemble de ces résultats est représenté dans la

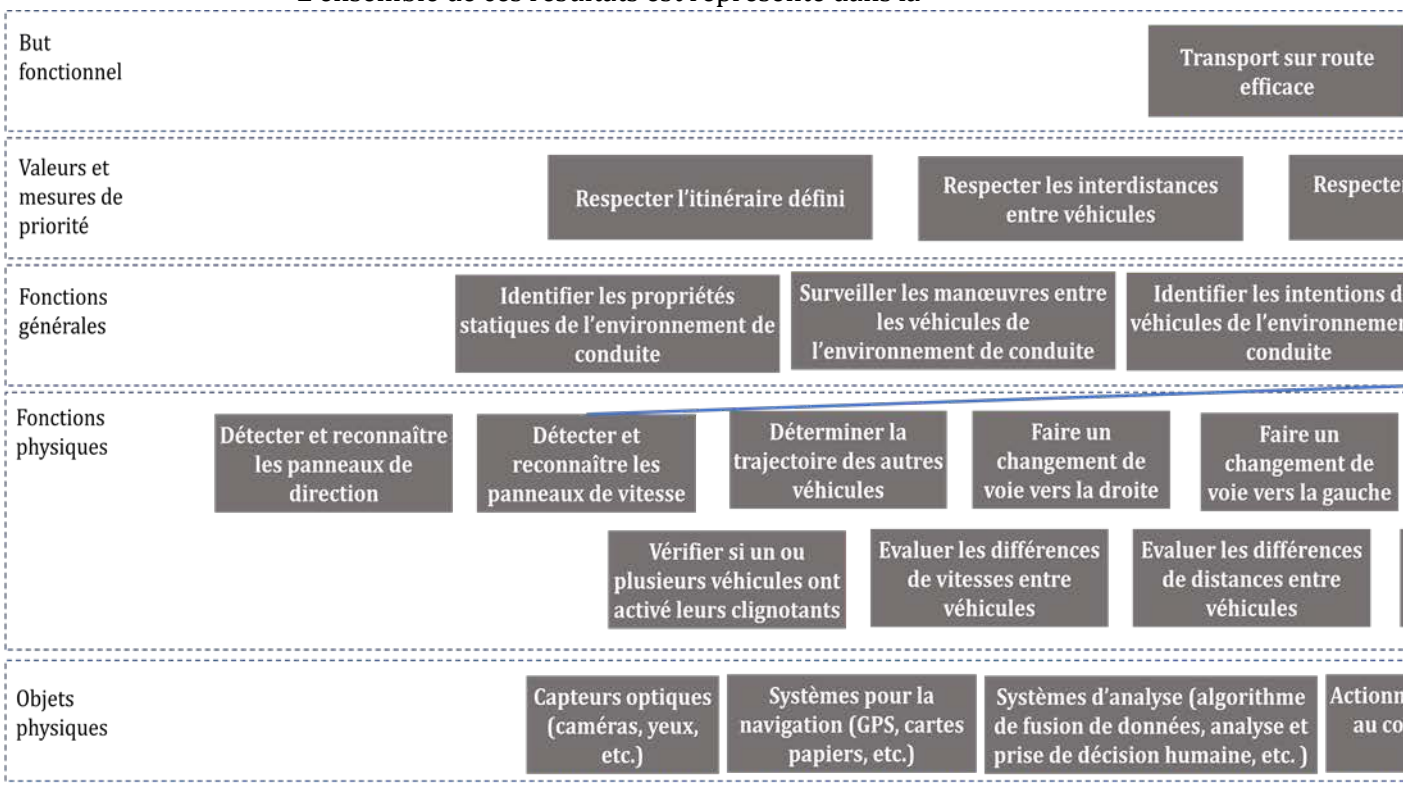


Figure 31.

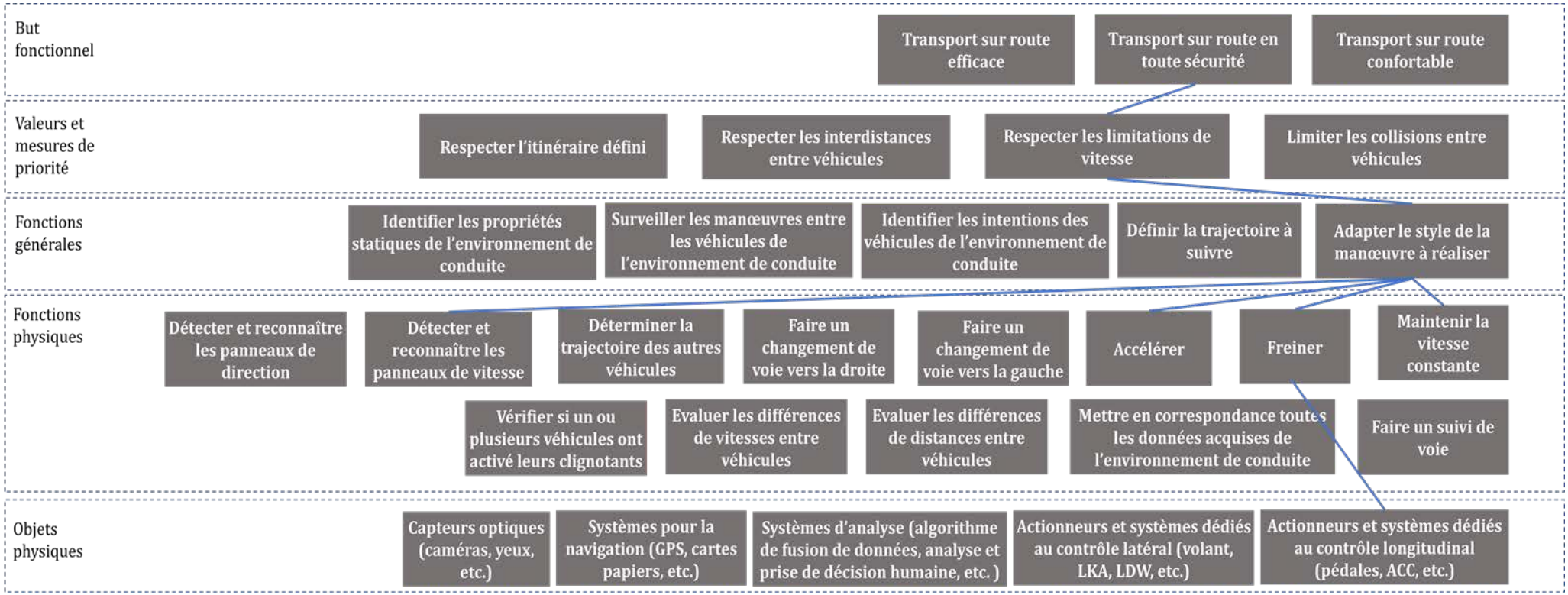


Figure 31: Extrait d'analyse du domaine de travail de la voiture autonome. Les segments en bleu représentent les relations pouvant exister entre les différents niveaux. Ici, pour des raisons de lisibilité, nous ne les avons pas tous représentés.

b) La définition des besoins informationnels pour la conduite à partir de l'analyse du domaine de travail

Nous avons modélisé le domaine de la conduite à l'aide de la Hiérarchie d'Abstraction (HA), indépendamment de l'agent qui la réalise, agent technique ou humain. Comme l'ont précisé LI ET BURNS (2017), une fonction dans la Hiérarchie d'Abstraction peut être de la responsabilité de l'agent technique, de l'agent humain ou des deux (contrôle partagé). En d'autres termes, la Hiérarchie d'Abstraction peut servir de base pour l'allocation des fonctions. Dans leurs travaux, LI ET BURNS (2017) ont utilisé la Hiérarchie d'Abstraction du domaine de transaction financière pour mettre en évidence deux scénarios d'allocation de fonctions, l'un représentant une automatisation faible du domaine et l'autre une automatisation forte. Ces auteurs ont également spécifié que la mise en évidence des fonctions relatives aux objets (fonctions physiques) sur une interface permet de limiter les pertes de *Situation Awareness* chez l'agent humain.

Le Tableau 12 présente ces informations potentielles (i.e. potentiellement utiles), dans notre domaine d'étude. Par exemple, on peut mentionner les panneaux de vitesse et l'action de changement de voie identifiés respectivement par WDA-1 et WDA-8.

Tableau 19 : Informations potentielles issues de la WDA

ID	Information potentielle
WDA-1	Panneaux de vitesse
WDA-2	Panneaux de direction
WDA-3	Clignotants des autres véhicules
WDA-4	Trajectoire des autres véhicules
WDA-5	Différentiels de distances entre les véhicules
WDA-6	Différentiels de vitesses entre les véhicules
WDA-7	Fusion des données
WDA-8	Action de suivi de voie
WDA-9	Action de changement de voie vers la droite
WDA-10	Action de changement de voie vers la gauche
WDA-11	Accélération
WDA-12	Freinage
WDA-13	Maintien de la vitesse constante

L'analyse du domaine de travail nous a permis de définir les informations potentiellement utiles pour la réalisation de la tâche de conduite, sans se concentrer sur des situations de conduite particulières. Nos travaux portant sur la manœuvre de changement de voie, il est nécessaire d'identifier les besoins informationnels relatifs à cette manœuvre de manière spécifique. C'est la raison pour laquelle nous avons réalisé l'analyse de cette manœuvre en utilisant la *Control Task Analysis* (ConTA. Nous présentons cette analyse dans la section suivante.

III.2 L'analyse de la tâche de contrôle avec la double échelle de Rasmussen

L'analyse de la tâche de contrôle identifie les besoins associés aux modes connus de fonctionnement d'un système (JAMIESON ET AL., 2007). Un des outils utilisés par la ConTA est l'échelle double qui présente les différentes étapes des activités de diagnostic et de prise de décision en termes de processus de traitement de l'information et d'états intermédiaires de

connaissance. Les étapes ne s'enchaînent pas nécessairement de manière linéaire. Un agent (humain ou technique) peut effectuer des raccourcis. Par exemple, la perception d'un signal peut impliquer une action corrective immédiate sans passer par les étapes intermédiaires d'analyse de l'information. Par conséquent, certaines étapes peuvent être court-circuitées.

Dans nos travaux, nous avons développé une échelle double pour la réalisation du changement de voie en nous basant sur la réalisation de ladite manœuvre par un agent humain. Cependant, il est nécessaire de rappeler que dans le projet LRA, le changement de voie se fait de manière entièrement autonome par la voiture. Notre approche est donc basée sur l'hypothèse fondamentale que l'agent humain aura besoin que l'agent technique lui renvoie des informations similaires à celles dont il (l'agent humain) aurait eu besoin s'il avait personnellement initié l'action.

a) L'échelle double de décision

La méthodologie est sensiblement la même que celle de l'analyse du domaine de travail. En effet, nous nous sommes focalisés sur la manœuvre de changement de voie en consultant plusieurs articles, notamment Lee, Olsen & Wierwille (2004), Naranjo, Gonzalez, Garcia et Pedro (2008) et Olsen (2003). Des interviews avec des collaborateurs Renault ont permis de compléter l'analyse. Les différentes étapes de l'échelle double ont été décrites en utilisant la terminologie de Rasmussen (1986b). Les lignes suivantes en donnent le détail. Le terme ego-voiture renvoie à la voiture autonome. Dans le cadre de nos travaux, nous nous sommes focalisés sur les routes à haute vitesse selon le cahier de charges du projet LRA.

- **But :** Dans le cadre du changement de voie, le but est d'aller d'une voie d'origine à une voie de destination (changement de voie) de façon sûre et de façon efficiente, en tenant compte des fenêtres temporelles et des contraintes de navigation.

- **Alerte :** Il s'agit des questions dont les réponses par l'affirmative vont engendrer une manœuvre de changement de voie. Nous avons identifié les questions suivantes qui renvoient à l'alerte :
  A 1 : Faut-il entrer dans une autoroute ?
  A 2 : Faut-il se préparer à une sortie ou sortir d'une autoroute ?
  A 3 : Faut-il anticiper l'insertion d'une voiture ?
  A 4 : Faut-il éviter des obstacles (travaux, accident) ?
  A 5 : Faut-il anticiper la venue d'une voiture approchant par l'arrière à vive allure ?
  A 6 : Faut-il retourner dans une voie privilégiée ?
  A 7 : Y a-t-il une diminution du nombre de voies disponibles ?
  A 8 : Y a-t-il une augmentation du nombre de voies disponibles ?
  A 9 : Y a-t-il une voiture lente devant l'égo-véhicule ?

- **Ensemble des observations :** Nous avons identifié neuf types d'informations.
  I 1. Quelle est la position longitudinale et latérale de l'égo-véhicule ?
  I 2. Quelle est sa vitesse ?
  I 3. Quelles sont les positions des véhicules dans la voie d'origine et dans celle de destination ?
  I 4. Quelles sont leurs vitesses ?
  I 5. Quels sont leurs types (camion, tracteur, citadine, etc.) ?
  I 6. Quelles sont les distances entre ces véhicules et l'égo-véhicule (proximité en distance) ?

I 7. Quelles sont les contraintes spatiales ?
I 8. Quelle est la configuration de la route ?
I 9. Quelles sont les conditions météorologiques ?
I 10. Quelles sont les limites d'accélération de l'égo-véhicule ?

- **État du système :** Nous avons identifié six états :
  S 1. Quelles sont les intentions des véhicules voisins ?
  S 2. Quelles sont les trajectoires des véhicules ou leurs actions en cours ?
  S 3. Est-ce que les distances de sécurité sont respectées (ainsi que le temps de suivi et le *Time To Collision*) ?
  S 4. Est-ce que les différentiels de vitesse et les inter distances sont suffisants pour permettre de faire un changement de voie ?
  S 5. Est-ce qu'une sortie doit être prise très prochainement (contraintes spatiales) ?
  S 6. Est-ce que les conditions météorologiques affectent le changement de voie ?

- **Les options** *:* Les quatre questions suivantes peuvent se poser :
  O 1. Est-il possible de faire un changement de voie en respectant les limitations de vitesse ?
  O2. Est-il possible de faire un changement de voie rapide (à cause d'une faible marge de manœuvre) ?
  O 3. Est-il possible de faire un changement de voie en toute sécurité ?
  O 4. Est-il possible de faire un changement de voie d'urgence (en cas de collision imminente avec un obstacle) ?

- **But choisi** (chosen goal) **:** Dans notre cas, le but étant unique, il est forcément choisi. Il s'agit donc d'aller d'une voie d'origine à une voie de destination (changement de voie) de façon sûre et de façon efficiente, en tenant compte des fenêtres temporelles et des contraintes de navigation.

- **État cible :** Nous avons identifié quatre options :
  T 1. Le changement de voie doit être fait en respectant les limitations de vitesse.
  T 2. Le changement de voie doit être rapide.
  T 3. Le changement de voie doit se faire en toute sécurité.
  T 4. Le changement de voie doit se faire en urgence.

- **Tâche :** Dans notre cas, la tâche à réaliser est liée à la trajectoire que doit prendre le véhicule.

- **Procédure :** Nous avons défini cinq actions/contrôles successifs :
  P 1. Activer le clignotant pour signaler aux autres usagers le début du changement de voie.
  P 2. S'approcher de la ligne séparatrice entre la voie d'origine et celle de destination. Accélérer pour dépasser la voiture devant l'égo-véhicule.
  P 3. Désactiver le clignotant.
  P 4. Stabiliser l'égo-véhicule dans la voie de destination par une décélération pour arriver à une vitesse constante.
  P 5. Suivre la trajectoire.

La Figure 32 présente les résultats de la modélisation. L'étape suivante consiste à déterminer les besoins informationnels qui découlent de cette analyse. Nous la présentons ci-après.

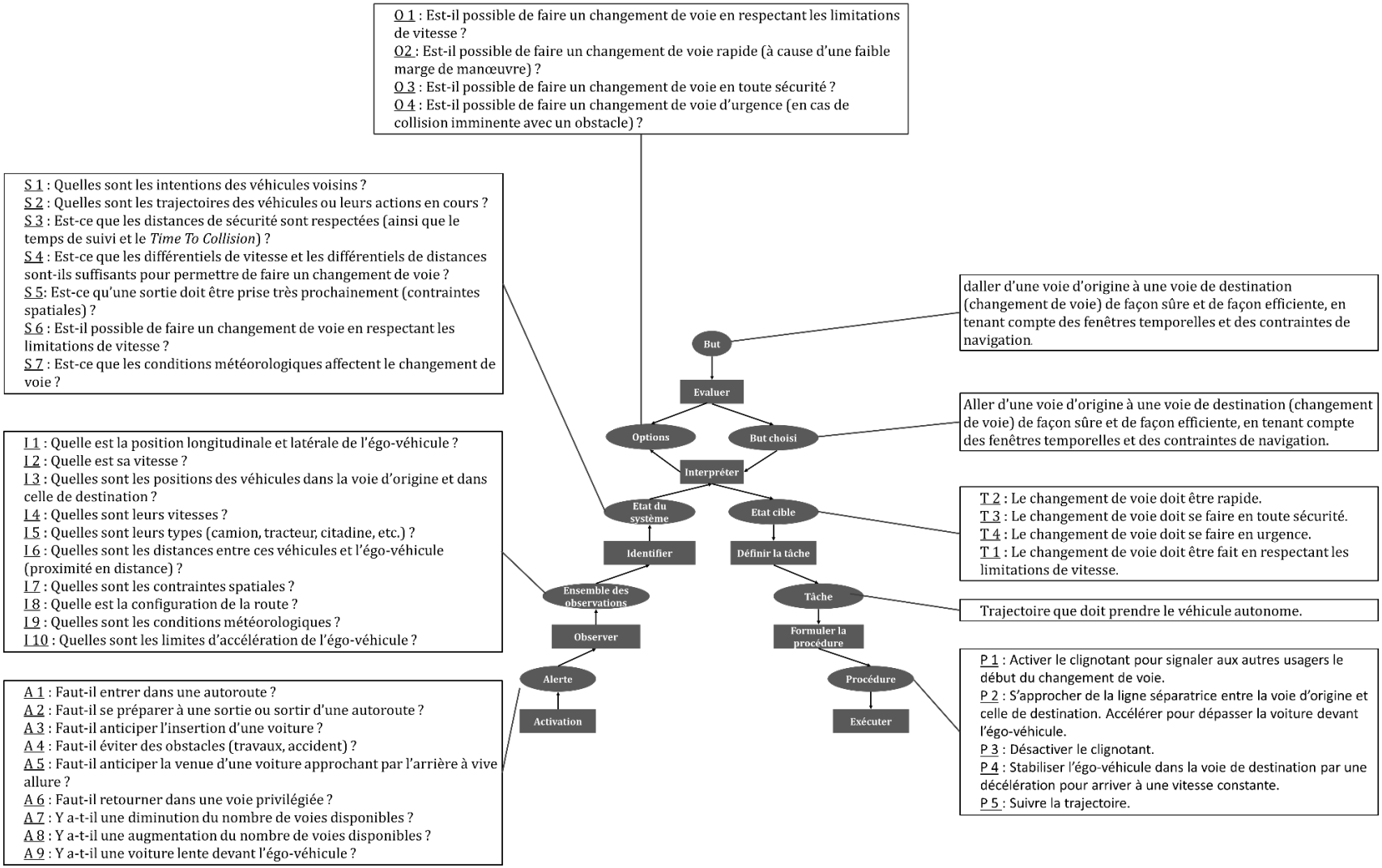


Figure 32 : Échelle double de Rasmussen appliqué au changement de voie

b) La définition des besoins informationnels pour le changement de voie à partir de l'analyse de la tâche de contrôle

Afin de mettre en relation les résultats de notre analyse avec l'espace de travail commun qui doit s'établir entre l'agent humain et l'automate, nous avons divisé l'échelle double de Rasmussen en quatre régions correspondant aux quatre fonctions du traitement de l'information de PARASURAMAN ET AL. (2000) pouvant être automatisées : « acquisition de l'information », « analyse de l'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action » (Figure 33). Cette approche a déjà été utilisée par LI ET BURNS (2017) :

- L'alerte et l'ensemble des informations relèvent de la fonction « Acquisition de l'information » ;
- L'état du système relève de la fonction « Analyse de l'information » ;
- Les options, le but choisi et l'état cible relèvent de la fonction « Prise de décision » ;
- La tâche et la procédure relèvent de la fonction « Implémentation de l'action ».

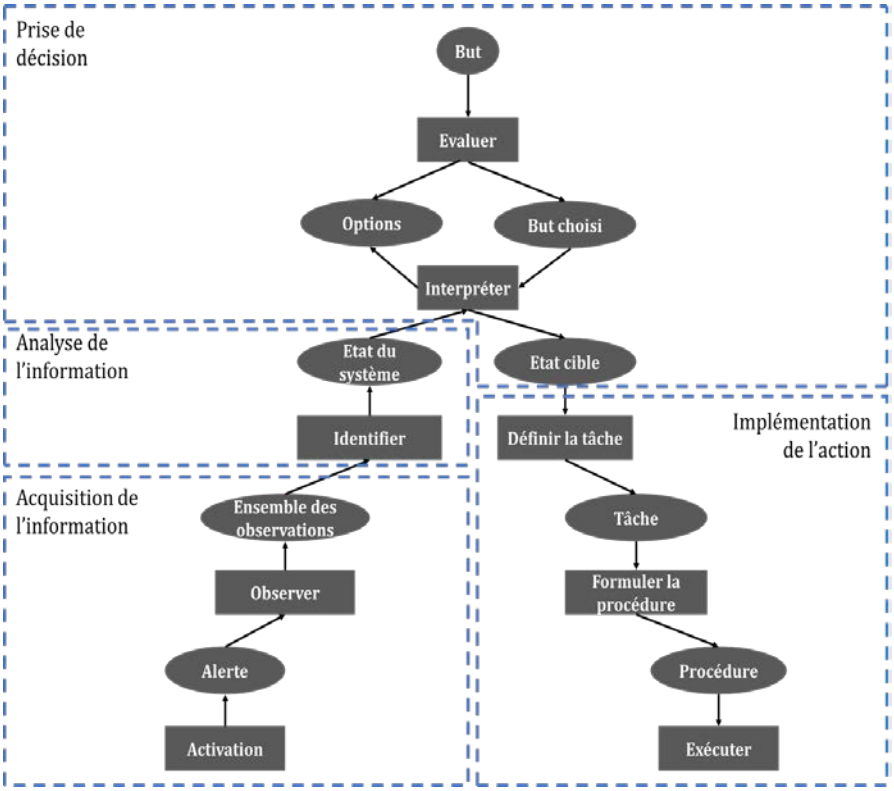


Figure 33 : La double échelle de Rasmussen divisée en quatre régions correspondant aux fonctions de Parasuraman et al. (2000)

Les besoins informationnels sont dérivés directement de cette échelle double. Par exemple,

- Pour la fonction « Prise d'information », A6 (Faut-il retourner dans une voie privilégiée ?) impose de communiquer le retour dans une voie privilégiée.
- Pour la fonction « Analyse de l'information », S 1 (Quelles sont les intentions des véhicules voisins ?) impose de communiquer les intentions des véhicules voisins.

- Pour la fonction « Prise de décision », T 2 (Le changement de voie doit être rapide) impose de communiquer la décision de faire un changement de voie rapide.
- Pour la fonction « Implémentation de l'action », P 4 (Stabiliser l'égo-véhicule dans la voie de destination par une décélération pour arriver à une vitesse constante) impose de communiquer la décélération de l'égo-véhicule.

Nous avons ainsi extrait les besoins informationnels fonction après fonction, lesquels sont consignés dans Le Tableau 20.

Tableau 20 : Besoins informationnels issus de la ConTA

ID	Besoin informationnel	Fonction du traitement de l'information
ConTA-1	Entrée sur autoroute	Prise d'information
ConTA-2	Sortie d'autoroute	
ConTA-3	Insertion d'une voiture devant l'égo voiture	
ConTA-4	Obstacles (travaux, accident)	
ConTA-5	Arrivée rapide d'une voiture approchant par l'arrière	
ConTA-6	Retour dans une voie privilégiée	
ConTA-7	Diminution du nombre de voies disponibles	
ConTA-8	Augmentation du nombre de voies disponibles	
ConTA-9	Voiture lente devant l'égo-véhicule	
ConTA-10	Position longitudinale et latérale de l'égo-véhicule	
ConTA-11	Vitesse de l'égo-véhicule	
ConTA-12	Positions des véhicules dans la voie d'origine et dans celle de destination	
ConTA-13	Vitesses des véhicules environnants	
ConTA-14	Types (camion, tracteur, citadine, etc.)	
ConTA-15	Distances entre ces véhicules et l'égo-véhicule (proximité en distance)	
ConTA-16	Contraintes spatiales (topologie de la route)	
ConTA-18	Conditions météorologiques	
ConTA-19	Limites d'accélération de l'égo-véhicule	
ConTA-20	Intentions des véhicules voisins	Analyse de l'information
ConTA-21	Actions des véhicules en cours	
ConTA-22	Niveau de respect des distances de sécurité	
ConTA-23	Différentiels de vitesse entre les véhicules	
ConTA-24	Différentiels de distances entre les véhicules	
ConTA-25	Sortie à prendre prochainement	
ConTA-26	Impact (positif ou négatif) des conditions météorologiques	
ConTA-27	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie en respectant les limitations de vitesse.	Prise de décision
ConTA-28	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie rapide	
ConTA-29	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie en toute sécurité	
ConTA-30	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie d'urgence	
ConTA-31	Possibilité (ou pas) de continuer de faire un suivi de voie	
ConTA-32	Possibilité (ou pas) de faire un dépassement	
ConTA-33	Action de changement de voie	

ConTA-34	Décision d'action de changement de voie rapide	
ConTA-35	Décision d'action de changement de voie normale (faite en toute sécurité)	
ConTA-36	Décision d'action de changement de voie urgente	
ConTA-37	Décision d'action de changement de voie immédiat	
ConTA-38	Non faisabilité du changement de voie	
ConTA-40	Activation du clignotant	Implémentation de l'action
ConTA-41	Accélération de l'égo-véhicule	
ConTA-42	Désactivation du clignotant.	
ConTA-42	Décélération	
ConTA-40	Maintien de la vitesse constante	
ConTA-43	Suivi de la trajectoire.	

Cette analyse (ConTA) couplée à la précédente permet d'identifier la majorité des besoins informationnels pour l'interface de la voiture autonome. Nous parlons de « majorité » parce que n'apparaissent pas dans cette analyse, les besoins informationnels relatifs à la coopération entre l'automate et l'agent humain. La CWA permet de définir ces besoins dans les étapes suivantes, notamment dans la SOCA. Dans le cadre du projet LRA, l'allocation des fonctions a été fixée dès le début : l'automate réalise toutes les manœuvres dans le mode autonome et l'agent humain doit reprendre la main pour contrôler le véhicule en mode manuel. De ce fait, les besoins informationnels issus de la coopération automate-agent humain peuvent être directement définis à partir du cahier de charges du projet LRA et des principes de transparence issus du modèle de transparence. Nous y reviendrons ultérieurement.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons l'ensemble des informations à communiquer sur la base de l'analyse du domaine de travail et de l'analyse de la tâche de contrôle faites précédemment.

III.3 Ensemble des besoins informationnels

Un examen minutieux du Tableau 19 et du Tableau 20 montre qu'il y a des besoins informationnels similaires entre les deux analyses, ce qui est bien entendu rassurant. Par exemple, WDA-6 qui représente les différentiels de vitesses entre les véhicules est identique à ConTA-23. Par conséquent, nous avons éliminé les doublons pour obtenir un tableau des besoins informationnels élémentaires, cf. Tableau 21.

Tableau 21 : Ensemble des besoins informationnels pour l'agent humain

ID	Besoin informationnel
IR-1	Panneaux de vitesse,
IR-2	Panneaux de direction
IR-3	Clignotants des autres véhicules
IR-4	Trajectoire des autres véhicules
IR-5	Différentiels de distances entre les véhicules,
IR-6	Différentiels de vitesses entre les véhicules,
IR-7	Fusion des données
IR-8	Action de changement de voie vers la droite,
IR-9	Action de changement de voie vers la gauche,
IR-10	Accélération
IR-11	Freinage
IR-12	Vitesse constante
IR-13	Entrée sur autoroute

IR-14	Sortie d'autoroute
IR-15	Insertion d'une voiture devant l'égo voiture
IR-16	Obstacles (travaux, accident)
IR-17	Arrivée rapide d'une voiture approchant par l'arrière
IR-18	Retour dans une voie privilégiée
IR-19	Diminution du nombre de voies disponibles
IR-20	Augmentation du nombre de voies disponibles
IR-21	Voiture lente devant l'égo voiture
IR-22	Position longitudinale et latérale de l'égo-véhicule
IR-23	Vitesse de l'égo-véhicule
IR-24	Positions des véhicules dans la voie d'origine et dans celle de destination
IR-25	Vitesses
IR-26	Types (camion, tracteur, citadine, etc.)
IR-27	Distances entre ces véhicules et l'égo voiture (proximité en distance)
IR-28	Contraintes spatiales (topologie de la route)
IR-29	Conditions météorologiques
IR-30	Limites d'accélération de l'égo-véhicule
IR-31	Intentions des véhicules voisins
IR-32	Actions des véhicules en cours
IR-33	Niveau de respect des distances de sécurité
IR-34	Sortie à prendre prochainement
IR-35	Impact des conditions météorologiques sur le changement de voie
IR-36	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie en respectant les limitations de vitesse.
IR-37	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie rapide
IR-38	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie en toute sécurité
IR-39	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie d'urgence
IR-40	Possibilité (ou pas) de continuer de faire un suivi de voie
IR-41	Possibilité (ou pas) de faire un dépassement
IR-42	Action de changement de voie
IR-43	Décision d'action de changement de voie rapide.
IR-44	Décision d'action de changement de voie faite en toute sécurité.
IR-45	Décision d'action de changement de voie urgente
IR-46	Décision d'action de changement de voie
IR-47	Non-faisabilité du changement de voie.
IR-48	Trajectoire de l'égo-véhicule
IR-49	Activation du clignotant
IR-50	Désactivation du clignotant.
IR-51	Stabilisation de l'égo-véhicule dans la voie de destination.
IR-52	Suivi de la trajectoire.

Grâce à l'analyse du domaine de travail et de l'analyse de la tâche de contrôle, les besoins informationnels ont donc pu être définis. Il faut à présent mettre en relation ces besoins avec les principes de transparence. Cette mise en correspondance est présentée dans les lignes suivantes.

IV. Mise en relation de la Cognitive Work Analysis et des principes de transparence

Pour faire écho à ce que nous avons mentionné précédemment, ce sont les principes de transparence que nous cherchons à valider dans nos travaux. Dans cette partie, nous mettons en correspondance ces principes (qui étaient jusqu'à maintenant génériques), avec les résultats de la *Cognitive Work Analysis* qui a permis de définir les besoins informationnels du conducteur lors d'une conduite en mode manuel. En effet, pour que le conducteur puisse comprendre ce que fait l'automate, il est primordial que ce dernier puisse communiquer des informations compréhensibles par le conducteur. Cette mise en correspondance est l'objet de cette partie.

IV.1 Besoins informationnels et principes de transparence

Les principes de transparence définis à partir du modèle de LYONS (2013) ont été examinés au regard des fonctions proposées par PARASURAMAN ET AL. (2000) (Tableau 22) d'une part et au regard du modèle de MICHON (1985) d'autre part (Tableau 18). Les besoins informationnels que nous avons extraits nous permettent de renseigner à présent chacun de ces principes.

Néanmoins, il est à noter, d'une part, que tous les besoins informationnels identifiés dans le Tableau 21 n'ont pas été utilisés parce que les techniques disponibles dans le projet étaient limitées. D'autre part, certains besoins informationnels qui ne figurent dans le Tableau 21, ont été ajoutés, notamment le mode de conduite en cours. En effet, même si ces informations n'ont pas été extraites grâce à la *Cognitive Work Analysis*, leur identification est directe à partir des principes de transparence, notamment le principe C2 figurant dans le modèle de Coopération (cf. Tableau 22).

Le Tableau 22 constitue une instanciation des principes selon les quatre fonctions « Prise d'information », « analyse de l'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action » de PARASURAMAN ET AL. (2000). Par exemple, le principe E1 selon lequel « *Dans le mode autonome établi, le conducteur doit avoir une perception suffisante de ce que la voiture autonome perçoit pour effectuer ses analyses et prendre ses décisions. Il doit être assuré que la voiture autonome dispose des informations nécessaires à la prise de décision.* », se traduira par la nécessité de communiquer au conducteur les informations suivantes :

- L'itinéraire à suivre ;
- La vitesse des véhicules environnants ;
- La position des véhicules environnants ;
- Le panneau de séparation d'autoroute ;
- Le panneau de sortie d'autoroute ;
- Le panneau de virage ;
- La présence d'obstacles sur la route ;
- Les types de véhicules.

Dans le

Tableau 23, les besoins informationnels pour chaque principe de transparence sont présentés suivant les niveaux de contrôle définis par le modèle de MICHON (1985) : niveau stratégique, niveau tactique et niveau opérationnel. C'est ainsi que le principe **T2** (*« Dans le mode autonome établi, dans un contexte, le conducteur doit être capable de percevoir l'intention de*

la voiture autonome (la manœuvre qu'elle va réaliser) et comprendre pourquoi cette manœuvre va être réalisée. ») doit mettre en évidence :

- Le différentiel de vitesse avec les véhicules environnants ;
- Le différentiel de distance avec les véhicules environnants ;
- L'intention de changement de voie ;
- L'évaluation de la faisabilité du changement de voie (possibilité) ;
- La séparation d'autoroute ;
- L'espace d'insertion dans la voie adjacente.

Certains auteurs comme VICENTE ET RASMUSSEN (1992) et HAJDUKIEWICZ ET BURNS (2004) ont observé que ce type d'analyses (analyse du domaine de travail et analyse de la tâche) mettait souvent en évidence des besoins informationnels qui ne pouvaient être extraits des systèmes d'instrumentation ou de contrôle existants. Cette remarque semble d'autant plus pertinente que dans le projet AMANDA, DEBERNARD ET AL. (1998) ont repensé la façon de résoudre un conflit aérien en tenant compte des besoins des aiguilleurs du ciel et en lui permettant de négocier avec la machine sur des aspects stratégiques. Ceci met bien en évidence que, bien souvent, un système de régulation est en capacité de prendre des informations en entrée pour calculer des sorties mais que les étapes intermédiaires ne sont pas accessibles à l'opérateur.

Dans notre cas d'étude, cette remarque de HAJDUKIEWICZ ET BURNS (2004) soulève la question de savoir si les capteurs disponibles et les algorithmes utilisés dans une voiture autonome peuvent permettre de communiquer tous les besoins informationnels que nous avons identifiés. Un travail de définition des différents éléments que peuvent fournir les systèmes actuels de la voiture a été nécessaire pour reprendre la démarche de JAMIESON ET AL. (2007) et de DEBERNARD ET AL. (1998). Nous examinons cette question plus en détail dans le paragraphe suivant.

Tableau 22 : Définition des informations par principe de transparence et par fonction de Parasuraman et al. (2000)

Modèles	Principes	Prise d'Information	Analyse de l'Information	Prise de Décision	Implémentation de l'Action
Modèle de l'objectif général	O1				
	O2				
	O3				
Modèle de la tâche	T1		▪ Vitesse limite sur le tronçon		▪ Action de changement de voie ▪ Action de suivi de voie ▪ Accélération ▪ Décélération
	T2		▪ Différentiel de vitesse avec les véhicules environnants ▪ Différentiel de proximité avec les véhicules environnants ▪ Séparation d'autoroute ▪ Espace d'insertion dans la voie adjacente	▪ Intention du changement de voie ▪ Évaluation de la faisabilité du changement de voie (possibilité)	
	T3		▪ Changement de voie des véhicules environnants	▪ Évaluation de la faisabilité du changement de voie (impossibilité)	
Modèle analytique	A1			▪ Décision d'accélération de la voiture autonome ▪ Décision de décélération la voiture autonome ▪ Décision de freinage de la voiture autonome	
	A2		▪ Arrivée d'une voiture prioritaire à l'arrière de la voiture autonome ▪ Arrivée d'une voiture rapide à l'arrière de la voiture autonome		
Modèle de l'environnement	E1	▪ Itinéraire à suivre ▪ Vitesse des véhicules environnants ▪ Position des véhicules environnants ▪ Panneau de séparation d'autoroute ▪ Panneau de sortie d'autoroute ▪ Panneau de virage ▪ Présence d'obstacles sur la route ▪ Types de véhicules			
	E2	▪ Limites des capteurs			
Modèle de la Coopération	C1				
	C2		▪ Tronçons où le mode autonome est disponible		

			▪ Tronçons où le mode manuel est disponible		
	C3				
Modèle de l'agent humain	H1				

Tableau 23 : Définition des informations par principe de transparence et par niveau de contrôle de Michon (1985)

Modèles	Principes	Niveau Stratégique	Niveau Tactique	Niveau Opérationnel
Modèle de l'objectif général	O1			
	O2			
	O3			
Modèle de la tâche	T1			▪ Action de changement de voie (vers la droite ou vers la gauche) ▪ Action de suivi de voie ▪ Accélération ▪ Décélération ▪ Vitesse limite sur le tronçon
	T2	▪ Séparation d'autoroute	▪ Différentiel de vitesse avec les véhicules environnants ▪ Différentiel de proximité avec les véhicules environnants ▪ Intention de changement de voie ▪ Évaluation de la faisabilité du changement de voie (possibilité) ▪ Espace d'insertion sur la voie adjacente	
	T3		▪ Changement de voie d'un véhicule environnant	
Modèle analytique	A1		▪ Décision d'accélération de la voiture autonome ▪ Décision de décélération de la voiture autonome ▪ Décision de freinage de la voiture autonome	▪ Accélération la voiture autonome ▪ Décélération de la voiture autonome ▪ Freinage de la voiture autonome
	A2		▪ Arrivée d'un véhicule prioritaire ▪ Arrivée d'une voiture rapide à l'arrière de la voiture autonome	
Modèle de l'environnement	E1	▪ Itinéraire à suivre	▪ Vitesse des véhicules environnants ▪ Position des véhicules environnants ▪ Panneau de séparation d'autoroute ▪ Panneau de sortie d'autoroute ▪ Panneau de virage	▪ Bords de voie ▪ Panneaux de signalisation

	E2			▪ Limites des capteurs
Modèle de la Coopération	C1			
	C2	▪ Tronçons où le mode autonome est disponible ▪ Tronçons où le mode manuel est disponible ▪ Mode actif (autonome ou manuel)		
	C3			
Modèle de l'agent humain	H1			

IV.2 Possibilité de communication des informations

Pour vérifier si les besoins informationnels que nous avons identifiés peuvent être effectivement communiqués à l'agent humain, nous avons utilisé un tableau similaire à celui de SALMON ET AL. (2007). Nos résultats sont consignés dans le Tableau 25. Pour obtenir ce tableau, nous avons vérifié le lien entre les besoins informationnels que nous avons identifiés précédemment et les objets physiques de la voiture autonome[30] (Annexe 1) (capteurs du Tableau 24 et autres systèmes d'aide à la conduite liés au changement de voie en particulier). Par exemple, les éléments relatifs à la météorologie peuvent être communiqués par les systèmes de navigation routière ou les systèmes de radio.

Tableau 24 : Quelques capteurs de la voiture autonome

Nom du capteur	Rôles
GPS	1. Calculer l'itinéraire entre un point A et un point B ; 2. Visualiser l'itinéraire par carte ; 3. Déterminer la position du véhicule.
Capteur infrarouge	1. Détecter les lignes et les obstacles pour s'assurer que la voiture reste bien sur la voie et ne gêne pas les autres véhicules.
Radar	1. Détecter la position des objets environnants, proches ou éloignés ; 2. Évaluer la distance d'un véhicule par rapport aux véhicules les plus proches.
Lidar *(capteur rotatif)*	1. Générer une carte 3D de l'environnement de la voiture, sur une portée de 60m.
Odomètre roue	Mesurer la vitesse ou la distance parcourue par la voiture, par le nombre de rotations des roues
Accéléromètre	1. Mesurer l'accélération
Capteur à ultrasons	1. Aider au stationnement sur une portée de 3m
Caméra stéréoscopique	1. Repérer les feux ; 2. Déchiffrer les panneaux et aider l'ordinateur à détecter les objets mobiles.
Système anti-franchissement de lignes	1. Détecter les variations au sol qui sont analysées par des algorithmes 2. Chercher des zones de couleur blanche en forme de ligne, à l'aide de caméras.
Centrale inertielle	1. Intégrer les mouvements de la voiture pour estimer son orientation et sa position 2. Compléter les données GPS.

Tableau 25 : Présentation des besoins informationnels dans les véhicules contemporains

ID	Besoin informationnel	Système
IR-1	Panneaux de vitesse,	Caméras
IR-2	Panneaux de direction	
IR-3	Clignotants des autres véhicules	
IR-4	Trajectoire des autres véhicules	
IR-5	Différentiels de distances entre les véhicules,	Radar

[30] Cette Hiérarchie n'étant pas le focus principal, nous le présentons en détail dans l'annexe 1.

IR-6	Différentiels de vitesses entre les véhicules,	Radar
IR-7	Fusion des données	Systèmes d'aide à la conduite
IR-8	Action de changement de voie vers la droite,	Système d'aide au changement de voie
IR-9	Action de changement de voie vers la gauche,	Système d'aide au changement de voie
IR-10	Décision d'accélération	Systèmes de régulation de vitesse
IR-11	Décision de freinage	Systèmes de régulation de vitesse
IR-12	Décision de vitesse constante	Systèmes de régulation de vitesse
IR-13	Entrée sur autoroute	Caméras
IR-14	Sortie d'autoroute	Caméras
IR-15	Insertion d'une voiture devant l'égo-véhicule	Radar
IR-16	Obstacles (travaux, accident)	Caméras
IR-17	Arrivée rapide d'une voiture approchant par l'arrière	Radars
IR-18	Nécessité de retour dans une voie privilégiée	Système d'aide au changement de voie
IR-19	Diminution du nombre de voies disponibles	Systèmes de navigation routière
IR-20	Augmentation du nombre de voies disponibles	Systèmes de navigation routière
IR-21	Voiture lente devant l'égo-véhicule	Radar
IR-22	Position longitudinale et latérale de l'égo-véhicule	GPS
IR-23	Vitesse de l'égo voiture	Odomètre
IR-24	Positions des véhicules dans la voie d'origine et dans celle de destination	Radar
IR-25	Vitesses	Radar
IR-26	Types (camion, tracteur, citadine, etc.)	Lidar
IR-27	Distances entre ces véhicules et l'égo-véhicule (proximité en distance)	Radar
IR-28	Contraintes spatiales (topologie de la route)	Caméras
IR-29	Conditions météorologiques	Systèmes de navigation routière
IR-30	Limites d'accélération de l'égo-voiture	Odomètre
IR-31	Intentions des véhicules voisins	Caméras
IR-32	Actions des véhicules en cours	Caméras
IR-33	Niveau de respect des distances de sécurité	Radar
IR-34	Sortie à prendre prochainement	Systèmes de navigation routière
IR-35	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie en respectant les limitations de vitesse	Systèmes d'aide au changement de voie
IR-37	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie rapide	
IR-38	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie en toute sécurité	
IR-39	Possibilité (ou pas) de faire un changement de voie d'urgence	
IR-40	Possibilité (ou pas) de continuer de faire un suivi de voie	
IR-41	Possibilité (ou pas) de faire un dépassement	
IR-42	Action de changement de voie	
IR-43	Décision d'action de changement de voie rapide.	
IR-44	Décision d'action de changement de voie faite en toute sécurité.	
IR-45	Décision d'action de changement de voie urgente	
IR-46	Décision d'action de changement de voie immédiat	
IR-47	Non faisabilité du changement de voie.	
IR-48	Trajectoire de l'égo-voiture	Système d'assistance à la conduite

IR-49	Activation du clignotant	Clignotant
IR-50	Désactivation du clignotant.	Clignotant
IR-51	Stabilisation de l'égo-voiture dans la voie de destination.	Systèmes d'aide à la conduite
IR-52	Suivi de la trajectoire.	Systèmes d'aide à la conduite

En résumé, la plupart des besoins informationnels peuvent être communiqués par les systèmes. Cependant, certains besoins informationnels comme l'intention de changement de voie et les raisons qui le justifient ne sont pas directement « communicables » à partir des systèmes usuels. Il sera donc nécessaire d'apporter des modifications dans le dispositif expérimental pour pouvoir les présenter sur l'interface.

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons contextualisé le modèle de LYONS (2013) en proposant 12 principes dits de transparence applicables à la conduite automobile autonome (DEBERNARD, CHAUVIN, POKAM & LANGLOIS, 2016). Il s'agit d'une première tentative dans le domaine de la conduite automobile. En effet, l'utilisation des modèles-cadres de la transparence tels que celui de CHEN ET AL. (2014) se limite à des systèmes spécifiques, ce qui rend difficile leur généralisation et leur application à des systèmes différents. Ces principes restent à un niveau d'abstraction élevée, mais correspondent aux besoins informationnels nécessaires pour que le conducteur puisse comprendre la machine, pour qu'elle soit transparente. Nous avons ensuite utilisé la *Cognitive Work Analysis* pour extraire les informations concrètes utilisées par un conducteur lors d'une activité de conduite manuelle. Nous avons pu ainsi, pour chaque principe, associer un ou plusieurs besoins informationnels. Nous nous sommes assurés que ces besoins pouvaient être communiqués par les technologies existantes dans la voiture autonome. De manière générale, notre approche peut être appliquée à des véhicules autonomes différents de celui du projet LRA cependant elle reste chronophage dans un environnement industriel où les enjeux de production sont parfois immédiats.

Après avoir déterminé les informations à présenter au conducteur (le signifié), il est nécessaire de définir la structure de leur affichage ainsi que la forme sous laquelle ces informations seront communiquées à l'agent humain (le signifiant). Quelques besoins informationnels ayant été identifiés comme non communicables en l'état par la voiture autonome, une modification de l'automate utilisé a dû être réalisée. Nous aborderons ces différents aspects dans le chapitre suivant.

.

Chapitre V. **Architecture technique et représentation graphique**

I. Introduction

De nombreux travaux portent une attention particulière à la façon dont les informations doivent être communiquées à l'agent humain. Dans le domaine de la conduite automobile, on parle généralement de « modalité ». Elle peut être auditive et/ou vocale, visuelle, olfactive et même haptique (HO, TAN & SPENCE, 2005). La multimodalité (combinaison de 2 ou 3 modalités) présente un intérêt majeur notamment parce qu'elle se rapproche d'une communication humain-humain. Cependant, dans nos travaux, et selon le cahier de charges du projet LRA, nous nous focaliserons sur une seule modalité, la modalité visuelle utilisant en particulier la Réalité Augmentée. La plus-value de cette dernière a été présentée dans le chapitre II. Tout l'enjeu des représentations graphiques est qu'elles soient suffisamment intuitives pour que l'agent humain comprenne le comportement de la voiture autonome et perçoive correctement son environnement extérieur. À notre connaissance, c'est la première fois que la RA sera utilisée avec l'objectif de favoriser la transparence d'un système.

Outre la représentation graphique des informations à afficher, il est nécessaire de maîtriser le fonctionnement de l'automate, pour acquérir les informations déterminées dans le chapitre précédent, comme par exemple les intentions de changement de voie. En effet, la connaissance des différents modules et la manière dont ils interagissent est fondamentale pour comprendre comment l'automate traite concrètement les données qu'il acquiert de l'environnement de conduite, que ce soit pour l'analyse de la situation, les prises de décisions et enfin la réalisation des manœuvres. Dans le cadre du travail présenté dans ce manuscrit, l'automate est intégré au simulateur de conduite utilisé pour la validation expérimentale.

Ce chapitre est divisé en deux sections principales. La section II est consacrée à la présentation de l'architecture fonctionnelle de l'automate. Nous y présentons en particulier les différents modules qui le constituent. Dans la section III, nous portons une attention particulière aux choix des représentations graphiques et présentons les séances de créativité qui ont conduit à les réaliser.

II. Architecture fonctionnelle de l'automate

L'automate est constitué d'un ensemble de fonctions qui permettent d'une part de rendre le véhicule simulé autonome en assurant les contrôles latéral et longitudinal et d'autre part de gérer les interfaces associées. Bien entendu, cet automate est directement connecté au simulateur de conduite DrSIHMI utilisé dans le cadre de l'évaluation expérimentale qui sera présentée dans la troisième partie de ce mémoire.

L'automate et la gestion des IHM comprennent les modules suivants, Figure 34 :

- Le module de perception, simulant les différents capteurs, permet de récupérer les informations telles que la position des véhicules environnants.
- Le module d'évaluation de la situation permet de décrire la situation de conduite en estimant par exemple la proximité entre les différents véhicules.
- Le module décisionnel décide de déclencher ou non une manœuvre de changement de voie ;
- Le superviseur de conduite est en charge de la réalisation des différentes manœuvres de conduite (changement de voie et suivi) ainsi que de la régulation de la vitesse.
- Le superviseur IHM pilote l'affichage des différentes informations aussi bien au niveau de leur représentation graphique que de leur position sur les afficheurs.
- Les modules de gestion des différents afficheurs.

La Figure 34 met en évidence les relations existant entre ces différents modules au sein du simulateur. Dans les lignes suivantes, nous détaillons chacun de ces modules.

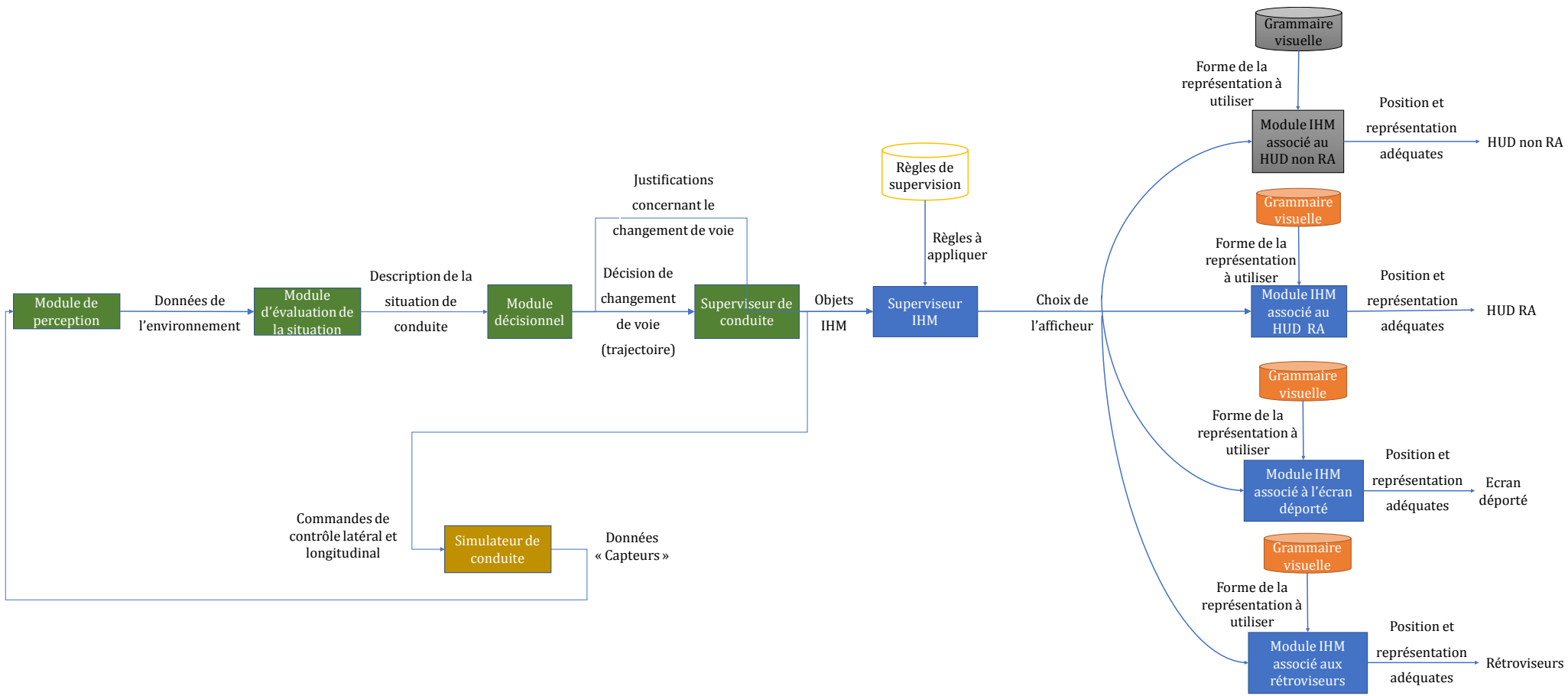


Figure 34 : Architecture fonctionnelle du simulateur

II.1 Le module de perception

Le module de perception de la situation simule les capteurs dont dispose l'égo-véhicule : radar, lidar, caméra, odomètre, etc. Grâce à la fusion des données issues de ces différents capteurs, les objets peuvent être identifiés jusqu'à 150 m devant et derrière l'égo-véhicule (Figure 35). Ils permettent de détecter les différentes entités de l'environnement telles que les véhicules proches, les panneaux de signalisation, etc.

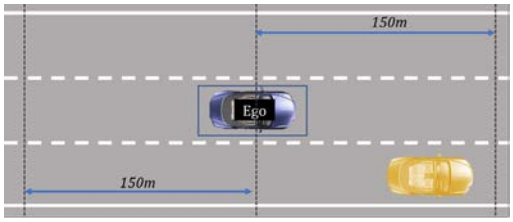


Figure 35 : Portée des capteurs de la voiture autonome dans le projet LRA

II.2 Le module d'évaluation de la situation

Le module d'évaluation de la situation repose sur une macro-description de la scène de conduite. Cette macro-description intègre la reconnaissance de la position des entités détectées dans l'environnement de conduite. Sur la base de la définition de de ULBRICH, MENZEL, RESCHKA, SCHULDT ET MAURER (2015) cette macro-définition inclut :

- **La définition des dynamiques** des entités mobiles de l'environnement tels que les véhicules proches et les piétons, définition permettant de les lier à des états et attributs. Nous avons eu recours à une description simplifiée pour décrire les positions latérale et longitudinale d'un véhicule par rapport à l'égo véhicule (voiture autonome), Figure 11.
    - Au **niveau latéral**, deux termes peuvent être utilisés : « à gauche » et « à droite », la position centrale étant implicite si rien n'est indiqué.
    - **Au niveau longitudinal**, trois termes peuvent être utilisés : « qui précède », « qui suit » et « au même niveau ».

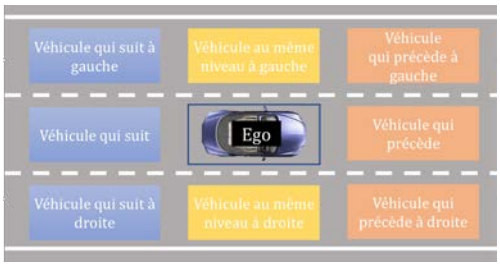


Figure 36 : Description qualitative des positions des véhicules par rapport à l'égo véhicule

Ensuite, les coordonnées des véhicules ont été repérées dans un repère de Frenet, dont l'origine est la position projetée du véhicule autonome sur la courbure de la route. Le repère de Frenet est un repère de référence utilisé initialement pour l'analyse des courbes (WILLMORE, 2012).

- **La description de la scène** qui inclut les éléments statiques de l'environnement tels que la géométrie ou la position des panneaux de signalisation. Dans le projet LRA, une carte numérique a été utilisée pour faire cette description. Puisque nous étions dans un environnement de simulation, cette carte a été simulée grâce à un réseau routier RoadXML connu dans la simulation de conduite (CHAPLIER, THAT, HEWATT, & GALLEE,

2010). Ce réseau a permis en particulier d'extraire les géométries des différentes portions de la route.

- **La représentation propre** qui renvoie aux états et attributs de l'égo-véhicule qui est dans ce cas la voiture autonome.

L'évaluation faite de la situation permet ensuite à l'automate de prendre des décisions notamment grâce à un module décisionnel.

II.3 Le module décisionnel

L'objectif principal du module décisionnel est de communiquer au superviseur de conduite la trajectoire à suivre par l'automate et les éléments de justification de manœuvre qui constituent des objets IHM pour le superviseur IHM. L'architecture initiale du simulateur ne permettant pas d'extraire les éléments de justification, ce module a été développé à cette fin. Il comprend deux sous-modules : un sous-module lié à l'intention du changement de voie et un autre relatif à l'évaluation de la faisabilité du changement de voie, Figure 37.

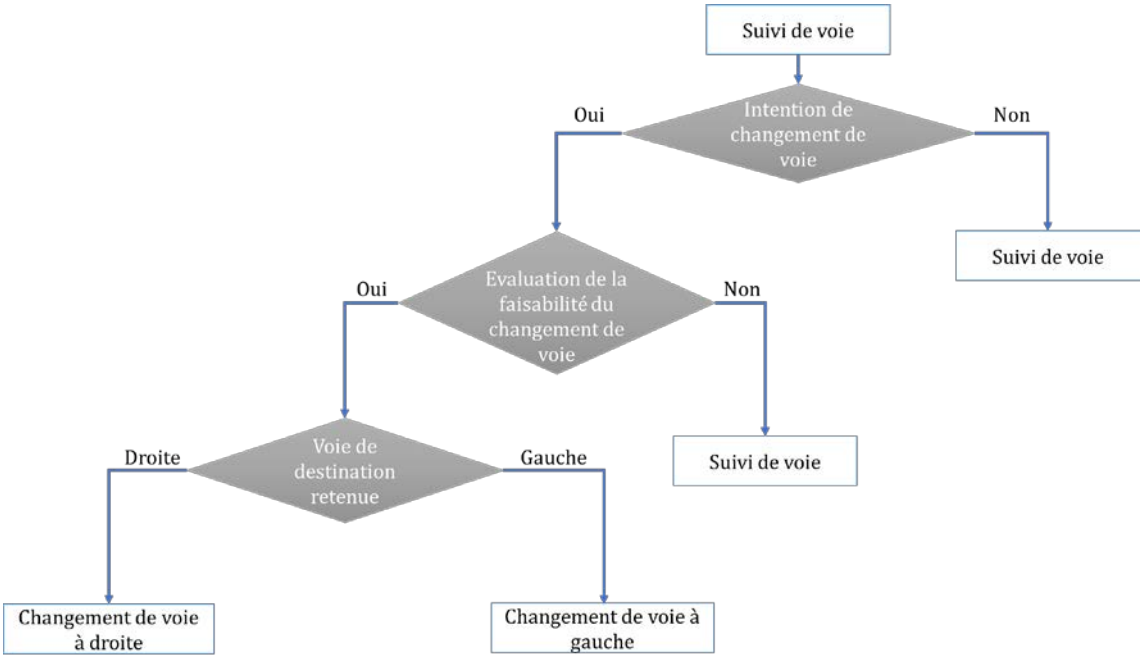


Figure 37 : Les deux sous-modules du module décisionnel

- **Un sous-module lié à l'intention de changement de voie :** Sur la base de l'évaluation de la situation de conduite, ce module évalue s'il est nécessaire de faire un changement de voie. Par exemple, la présence d'un véhicule lent et proche doit déclencher un changement de voie pour que la vitesse de consigne puisse être maintenue.

- **Un sous-module lié à l'évaluation de la faisabilité du changement de voie :** Ce module, quant à lui, évalue la faisabilité du changement de voie vers la gauche ou vers la droite. Il s'agit en particulier d'évaluer la distance entre l'égo-véhicule et le véhicule situé devant l'égo-véhicule dans la voie de destination d'une part, et la distance entre l'égo-véhicule et le véhicule situé derrière l'égo-véhicule dans la même voie de destination d'autre part. Les deux distances doivent être suffisantes pour faire le changement de voie. Les sorties de ce module sont envoyées au module de réalisation des manœuvres.

Il est important de préciser que, d'un module à l'autre, il est possible de modifier un choix initial. Par exemple, concernant l'évaluation de la faisabilité du changement de voie, si à un instant *t*, il n'y a aucun véhicule sur la voie gauche que souhaite rejoindre le véhicule autonome, l'insertion est possible si l'espace d'insertion est suffisant. Toutefois, si le cycle de calcul suivant, un véhicule arrive à grande vitesse, la possibilité du changement de voie est annulée. En termes d'affichage - et en lien avec les principes de transparence - la justification de la possibilité du changement de voie et de la rétractation doivent être clairement explicitées. C'est d'ailleurs la raison principale pour laquelle nous avons ajouté ce module à l'architecture initiale du simulateur ; les sorties de justification seront directement envoyées au superviseur IHM en charge de coordonner les différents affichages. Par ailleurs, ce module alimente le superviseur de conduite en lui communiquant la décision (positive ou négative) de changement de voie et la trajectoire associée.

II.4 Le superviseur de conduite

Ce module assure en mode autonome le contrôle latéral et le contrôle longitudinal de la voiture pour réaliser un suivi de voie, ou un changement de voie, vers la gauche ou la droite. Nous n'avons pas travaillé à la spécification de ce superviseur. De plus amples informations concernant ce superviseur peuvent être retrouvées dans Guo (2017).

II.5 Le superviseur IHM

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le superviseur IHM reçoit les justifications d'intention et d'évaluation (positive ou négative) du changement de voie. Par ailleurs, le superviseur IHM est également alimenté par des informations issues du superviseur de conduite. Les éléments qui alimentent le superviseur IHM sont appelés « objets IHM ». Pour déterminer le traitement à accorder à chaque objet IHM, le superviseur IHM utilise un ensemble de règles dites de supervision. Celles-ci définissent les contextes dans lesquels telle information ou telle autre doit être affichée. Pour définir une règle, trois éléments sont pris en compte :

- **Un contexte** : Il est défini grâce à un ensemble de paramètres de l'environnement de conduite et du mode de fonctionnement de l'égo-véhicule (automate actif ou pas).

- **Un objet** : C'est une information à communiquer à l'agent humain par le biais des afficheurs. Cette information peut être communiquée de manière à susciter trois types d'interaction entre l'agent humain et l'automate :
  - <u>Une notification</u> : L'information est communiquée de manière unidirectionnelle vers l'agent humain. Dès lors, aucune action de sa part n'est requise.
  - <u>Un dialogue</u> : Cette interaction suggère qu'il y a un échange entre l'agent humain et l'automate. Ainsi, l'automate peut poser une question à l'agent humain et vice versa. Les réponses données orientent l'affichage ou pas de telle information sous la forme de symboles spécifiques.
  - <u>Le contrôle</u> : Dans ce type d'interaction, l'agent humain peut modifier certains paramètres d'affichages pour obtenir un rendu qu'il désire.
    Dans le projet LRA, nous avons utilisé un seul type d'interaction, les notifications, compte tenu du cahier des charges initial.

- **Une action** : Dans une règle, un objet qui est considéré comme le point de départ, va provoquer une action à partir du superviseur IHM. Il existe plusieurs types d'actions :
  1. L'objet est transféré à un ou plusieurs dispositifs d'affichage.

2. Le niveau de priorité d'un objet est modifié.
3. L'objet est ignoré.
4. L'objet est supprimé.

Une règle se structure de la manière suivante, Figure 38.

```
Point de départ : Nom de l'objet
Condition :
                    Sur l'objet
                        Paramètre X : valeur minimale/valeur maximale
                        Paramètre Y : valeur minimale/valeur maximale
                    Sur le contexte (nom)
                        Valeur minimale
                        Valeur maximale
Action sur l'objet.
```

Figure 38 : Structure d'une règle

Dans le cadre de la spécification des IHM, près d'une centaine de règles ont été définies. Par exemple, la règle : « *En mode autonome, si un véhicule qui a été détecté comme un véhicule cible par le VA est à moins de 5m et si la vitesse de ce véhicule est supérieure à 130km/h, alors l'annotation de véhicule-cible doit être affichée dans le HUD avec une priorité élevée.* » La Figure 39 présente la mise en œuvre de cette règle en mode autonome avec comme contexte « La vitesse du véhicule-cible qui est situé à 3 m de la voiture autonome, est égale à 130km/h. » L'objet est le « véhicule cible » qui comprend plusieurs paramètres :

- Priorité = Élevée,
- Présence = Oui,
- Distance = 3m.

Compte tenu de tous ces paramètres, il faut en termes d'action, afficher l'objet sur le HUD.

```
Objet       <Véhicule Cible>
                    Priorité=Élevée
                    Présence=Oui
                    Distance=3

Contextes   (<Vitesse du véhicule>, 130)
            (<Mode AD>, Activé)

Règle       Point de départ <Véhicule cible>
            Condition       Sur l'objet:        Véhicule cible          Présence=Oui
                                                                        Distance  min=0     max=5
                            Sur le contexte:    Vitesse du véhicule     Valeur    min=130   max=200
                                                Mode AD   Activé
            Action          Affichée sur le HUD
                            Priorité =critique
```

Figure 39 : Exemple de traduction d'une règle

Nous avons spécifié près de 20 règles de supervision, lesquelles ont été implémentées par des ingénieurs, collaborateurs du projet LRA. Le superviseur IHM,s'exécute toutes les 3 millisecondes, et transfère ses sorties aux modules pilotant les afficheurs à chaque cycle.

II.6 Les modules pilotant les différents afficheurs

Dans le simulateur utilisé pour le projet LRA, plusieurs afficheurs sont disponibles : l'afficheur tête haute avec Réalité Augmentée, l'afficheur tête haute non Réalité Augmentée, l'écran de simulation pour les parties correspondant aux rétroviseurs et l'écran déporté. Le module associé aux afficheurs est chargé d'afficher les informations transmises par le superviseur IHM sous la bonne forme et sur le bon afficheur. L'ensemble des formes ou représentations graphiques des informations utilisées est contenu dans la grammaire visuelle. La représentation graphique est importante dans le sens où la forme des représentations joue un rôle sur la perception, et la bonne compréhension de ces informations par l'agent. C'est la raison

pour laquelle dans les lignes suivantes, nous portons une attention particulière à la représentation graphique en mettant en évidence les choix graphiques que nous avons réalisés.

III. Organisation et représentation graphique des informations

Nous avons présenté de manière générale la manière dont les informations sont gérées sur les afficheurs par le simulateur DrSIHMI. Dans cette section, nous mettons l'accent sur la façon dont les informations ont été organisées sur les différents afficheurs et la manière dont elles ont été représentées.

III.1 Organisation des informations

La question de la représentation d'une information est d'une grande importance. En effet, un mode de représentation dans un contexte donné peut influencer la perception qu'en a l'agent humain. Dans le but d'examiner l'organisation des informations proposée par les constructeurs, nous avons analysé 12 interfaces de voiture avec Réalité Augmentée, indépendamment de la technologie utilisée (téléphone ou HUD). Nous présentons dans ce manuscrit les résultats de l'analyse de deux interfaces : Thinkware (Figure 40) et Pioneer (Figure 41). Le choix s'est porté sur ces interfaces parce qu'elles mettent en évidence des informations relevant des trois niveaux de contrôle de MICHON (1985) sur des afficheurs de Réalité Augmentée, sans toutefois distinguer clairement ces différents niveaux.

Figure 40 : Interface Thinkware (Source: http://e27.co/korean-in-car-navigation-startup-launches-augmented-reality-driving-system-20141230/)

Figure 41 : Interface Pioneer (Source : http://phys.org/news/2011-05-augmented-reality-cars.html)

Dans l'une et l'autre de ces interfaces, il n'y a pas de distinguo évident entre les niveaux stratégique, tactique et opérationnel. Dès lors, comment un conducteur peut-il déterminer simplement et rapidement si, par exemple, une flèche représente un ordre, une information, une intention, une action ? Nous pensons qu'il est nécessaire d'éviter toute ambiguïté, notamment dans des situations de reprise en main. En effet, la confusion entre deux symboles peut être embarrassante. Ainsi, sur l'interface Pionner de la Figure 41, l'annotation sur la voiture qui précède l'égo-véhicule indique que l'automate a bien perçu cette voiture. Cependant, la

représentation utilisée ne permet pas de déduire intuitivement l'utilisation qu'en fait l'automate. Cette annotation indique-t-elle que le véhicule situé devant est un véhicule dangereux ? Suggère-t-elle qu'il faut prendre une décision et réaliser une manœuvre d'évitement ? De même, sur l'interface Thinkware, il n'est pas aisé de faire une différence intuitive entre les informations relevant du niveau tactique et celles relevant du niveau opérationnel. En effet, la compréhension des différents symboles bleus n'est pas directe. C'est la raison pour laquelle il nous a paru nécessaire de déterminer des représentations ou grammaires spécifiques organisées structurellement, afin de distinguer des informations ne relevant pas des mêmes niveaux ou fonctions. Cette organisation est représentée sur la Figure 42.

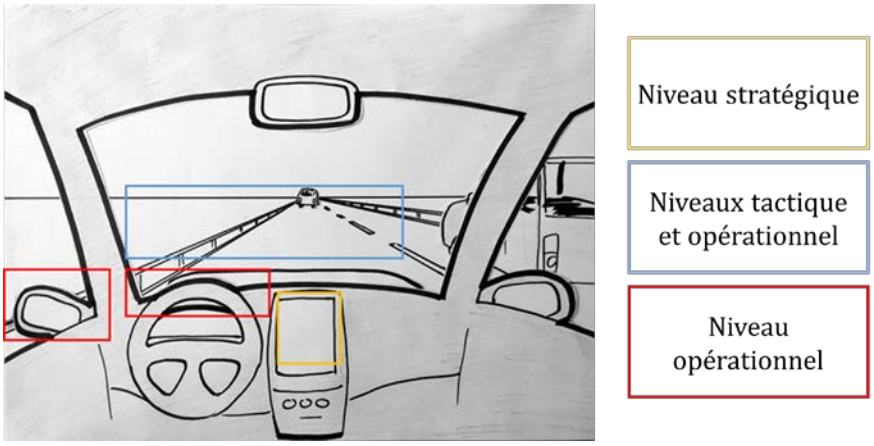


Figure 42 : Répartition des informations sur les écrans par niveau de contrôle

Dans la Figure 42, les principales zones d'affichage sont mises en évidence. Les encadrés rouges correspondent aux zones d'affichage pour le niveau opérationnel. L'encadré jaune, quant à lui, correspond aux informations du niveau stratégique. Dans l'expérimentation que nous avons réalisée, cet encadré correspond à un écran déporté n'utilisant pas la réalité augmentée pour éviter toute ambiguïté dans l'interprétation des différents symboles. Le dernier encadré bleu correspond aux informations affichées sur le HUD. Il est réservé aux informations des niveaux tactique et opérationnel. Parce qu'il n'a pas été possible de séparer structurellement ces deux types d'informations, des représentations graphiques spécifiques ont été conçues pour les distinguer.

L'organisation des informations ayant été précisée, nous abordons la question de la représentation graphique dans le paragraphe suivant.

III.2 Représentation graphique des informations

Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre II, la représentation graphique a une influence sur la *Situation Awareness* d'un agent humain. La plus-value de la Réalité Augmentée, démontrée par certains travaux présentés également dans le chapitre II, est de faciliter la construction et le maintien de la *Situation Awareness* dans le contexte de la conduite automobile ; nous avons donc utilisé une représentation en RA des informations pour favoriser la transparence.

Afin de ne pas proposer des concepts de représentation en Réalité Augmentée de façon hasardeuse, nous avons réalisé plusieurs séances de créativité pour définir la meilleure façon possible de représenter les informations liées aux principes de transparence. ROY (cité par CARRIER, 1997) définit la créativité comme « *un processus intellectuel qui vise à provoquer le plus d'associations possibles, afin d'arriver à une nouvelle synthèse, un nouvel arrangement, d'où surgiront des nouveautés conceptuelles, des stratégies inattendues, des innovations* ». Deux

séances ont été conçues et réalisées. La première a consisté à définir quelques formes de représentation alors que la seconde a permis de faire le tri parmi les concepts de représentation issus de la première séance en tenant compte des paramètres de « compréhensibilité » et d' « intuitivité ». Nous présentons chacune de ces séances dans les paragraphes suivants.

a) 1ère séance de créativité : Séance de créativité générale

L'objectif de cette séance était d'avoir un premier jet des concepts de représentation associées aux différents besoins informationnels que nous avons définis. Il était donc important que la créativité des participants soit stimulée. Il existe plusieurs méthodes qui peuvent le faire ; elles sont classées en deux catégories (SHAH, SMITH, &VARGAS-HERNANDEZ, 2003) :

- Les **méthodes intuitives** qui visent la génération massive d'idées. Elles sont généralement efficaces pour des innovations qui créent une rupture avec l'existant.

- Les **méthodes logiques** qui ont une démarche plus systématique fondée sur une analyse plus détaillée de la problématique présentée. Se fondant sur l'existant, elles sont moins adaptées que les précédentes pour des innovations de rupture.

Dans le cadre de cette séance de créativité, nous avons opté pour des méthodes intuitives. En effet, la définition des interfaces homme-machine en réalité augmentée pour des voitures autonomes de niveau SAE 4 est loin d'être achevée ; nous considérons cela comme une innovation de rupture. Aussi avons-nous utilisé des outils couramment cités dans la littérature tels que le brainstorming (LANDAY & MYERS, 1995) et le sketching (LANDAY & MYERS, 2001). WALLAS (1926) a segmenté le processus créatif en quatre étapes :

- **Étape 1** : La préparation qui permet la connaissance du problème,
- **Étape 2** : L'incubation où le cerveau réalise des associations d'idées,
- **Étape 3** : L'illumination qui permet la sélection d'idées parmi celles qui ont été générées à l'étape précédente,
- **Étape 4** : La vérification qui consiste à évaluer l'idée retenue puis à apporter des modifications a posteriori.

Nous nous sommes basés sur une approche similaire, que nous présentons dans la suite. Dans leurs travaux, BILA-DEROUSSY, BOUCHARD ET KABA (2015) spécifient qu'une alternance entre créativité individuelle, design en groupe et une évaluation d'experts permettrait d'améliorer les interactions, de limiter toute frustration et de maximiser la cohésion de groupe. Nous avons, pour cette raison, alterner phase de réflexion personnelle et phase de travail en groupe.

i. *Les participants*

Les participants à cette séance de créativité étaient majoritairement des personnes travaillant à l'IRT SystemX, soit en tant que salariés de la structure, soit en tant que personnes mises à disposition par leur entreprise ou laboratoire. Quinze personnes ont accepté de participer, ainsi que cinq designers de l'école *Strate College*. Aucun critère particulier n'a été utilisé pour solliciter les participants. Ils devaient néanmoins avoir un permis de conduire, conduire un véhicule et être volontaires.

ii. *Matériel et procédure*

Pour cette séance, plusieurs supports ont été utilisés :

- Le *story board* : Imprimé en A4 et en A3, il est constitué des scènes mettant en évidence des séquences de changement de voie avec des positionnements spécifiques des voitures dans l'infrastructure. Par exemple, la Figure 43 présente trois scènes consécutives de changement de voie par la voiture autonome à cause d'un véhicule lent devant lui.

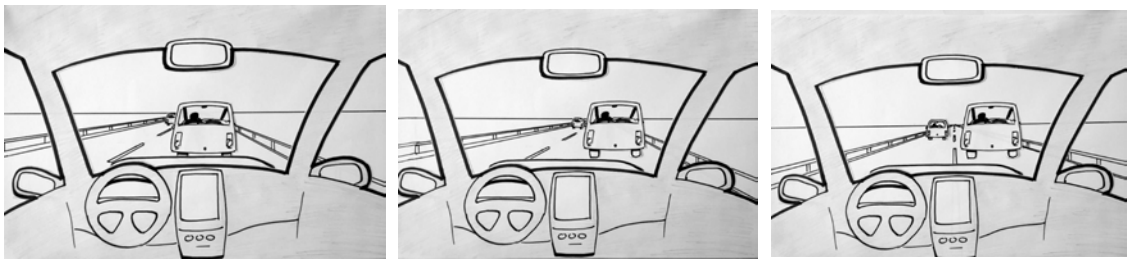


Figure 43 : Scènes de changement d'une voiture autonome

- Le tableau des informations : Ce tableau regroupait les principales informations susceptibles d'être utilisées par le conducteur pour effectuer un changement de voie ; elles sont issues de la CWA présentée au chapitre III.

- Le *paper board* : Il a pour but de consigner les éléments distincts de chaque logique et des concepts de représentation proposés par chaque groupe afin que tous les groupes y aient accès au fur et à mesure.

La séance était divisée en quatre parties. La phase initiale a consisté en la présentation des objectifs de la séance et de différents éléments filmographiques et graphiques pour stimuler la créativité des participants. La deuxième partie de la séance a consisté à faire travailler individuellement chaque participant sur le story-board en format A4 regroupant les différents scénarii retenus. Il était question, pour chacun d'entre eux, de représenter les informations qui leur semblaient les plus pertinentes selon la forme qui leur convenait. Après ce travail individuel, les participants ont été répartis en groupe de 4, avec un designer par groupe ; il y avait donc cinq groupes au total. Le but de cette troisième phase était de partager les idées qui avaient émané de la phase 2 pour aboutir à un consensus de groupe. Chaque groupe, grâce à son designer, a pu consigner ses logiques et ses concepts de représentation sur un story-board en format A3. Cette phase de *conversational sketching,* déjà utilisée par CRAFT ET CAIRNS (2009), a duré un peu moins d'une heure. Dans la quatrième partie, chaque groupe a exposé ses résultats aux autres. Il devait en particulier donner un nom à sa logique de représentation. Cette représentation avait pour but d'enrichir potentiellement les résultats intragroupes.

iii. Résultats

Cette séance de créativité générale a permis de déterminer plusieurs concepts de représentation qui ont été soumis ensuite à une évaluation avec deux autres tests : un test de compréhensibilité et un test d'intuitivité présentés ci-après.

b) 2ème séance de créativité : Test de compréhensibilité et test d'intuitivité

La conception d'interfaces doit prendre en compte la façon dont les informations sont représentées pour éviter la surcharge visuelle et faciliter la compréhension effective de ces informations. Nous présentons brièvement ici, la procédure que nous avons utilisée pour mener les tests de compréhensibilité et d'efficacité.

i. Participants

28 participants dont 10 femmes ont réalisé ces deux tests. Ils étaient tous employés de l'IRT SystemX. Ils ont été recrutés par email sur la base du volontariat. Nous avons juste pris la précaution de vérifier que les volontaires n'avaient pas assisté à la séance de créativité générale pour éviter des biais tels que la sélection d'un concept sur la base de ce qui avait été proposé dans la première séance. Aucun participant n'a reçu de compensation financière pour sa participation à l'étude.

ii. Matériel et procédure

Tous les participants étaient dans une même salle et les tests se faisaient sur papier. Au début de la séance, le projet LRA était présenté aux participants en leur expliquant en particulier le but d'une voiture autonome. L'objectif de l'étude leur était également présenté. Afin de susciter une (meilleure) immersion dans le contexte et une meilleure acceptabilité du système, deux précisions leur ont été communiquées.

1. Chacun d'entre eux doit s'imaginer dans une voiture autonome.
2. Chacun d'entre eux doit considérer que dans chaque situation, la voiture autonome prend les bonnes décisions.

Pour le test de compréhensibilité (GREEN, PETRE, & BELLAMY,1991), un concept de représentation était présenté à chaque participant. Il devait déterminer la signification de ce concept en tenant compte du contexte. Chaque participant devait ensuite indiquer le degré de certitude accordé à la réponse donnée. Pour ce faire, une échelle de Likert à 4 niveaux dont les extrémités correspondaient à « Très certain » et « très incertain » a été utilisée.

En ce qui concerne le test d'intuitivité (PFANNMÜLLER ET AL., 2015), chaque participant devait choisir, entre plusieurs concepts, celui qui apparaissait le plus convenable dans un contexte qui était décrit. Chaque participant devait ensuite évaluer le caractère intuitif du concept choisi sur une échelle de Likert à 5 niveaux dont les extrémités correspondaient à « Je suis totalement d'accord » pour dire que le concept était intuitif et à « Je ne suis pas d'accord ». L'option « Je ne sais pas » était aussi disponible.

iii. Résultats

Les séances de créativité ne faisant pas partie du cœur de cette thèse et pour éviter de rendre la lecture fastidieuse, nous n'entrons pas le détail de l'analyse de ces séances de créativité. Cependant, si le lecteur souhaite en savoir davantage sur le contenu de la première séance de créativité, nous l'invitions à lire un des articles que nous avons publiés à ce propos dans Ergo'IA, POKAM (2016). Pour la deuxième séance de créativité, les analyses ont été faites en suivant le modèle de PFANNMULLER ET AL. (2015). Sur la base de ces différents tests, les concepts de représentation du Tableau 26 ont été sélectionnés et développés. Cependant, ces concepts ne sont pas exhaustifs et ne correspondent pas à tous les principes, ceci pour deux raisons principales :

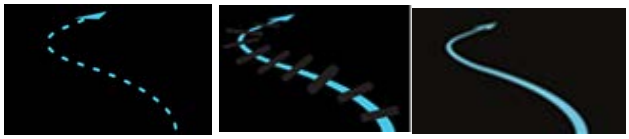
1. Le temps de développement possible pour les représentations était limité.
2. Les moyens techniques disponibles ne permettaient pas de développer certains concepts.

Dans le Tableau 26, les représentations graphiques (annotations) sont classées en fonction des niveaux tactique et opérationnel de Michon en lignes et selon les fonctions de traitement de l'information de PARASURAMAN ET AL. (2000) en colonnes.

Le tableau comportant beaucoup d'éléments, nous n'explicitons, ci-après, que quelques représentations dont le changement de couleur ou de forme est induit par un paramètre particulier :

- **Les annotations liées à la trajectoire** : En cas de suivi de voie, aucune annotation n'est indiquée. Lors d'un changement de voie, trois annotations sont nécessaires en fonction de la phase dans laquelle l'égo-véhicule se trouve. Pour représenter l'intention du changement de voie, la trajectoire est affichée avec une flèche discontinue (Figure 44.a). Lorsque le changement de voie est possible, c'est-à-dire que l'égo-véhicule peut s'insérer sur la voie adjacente, les traits de la flèche discontinue grossissent (Figure 44.b). Ils

deviennent ainsi plus épais. Enfin, lors de la dernière phase qui correspond au changement de voie effectif, la flèche devient pleine (Figure 44.c).



(a) (b) (c)

Figure 44 : Annotations pour le changement de voie. a) 'intention. b) Évaluation positive. c) action.

- **Les annotations liées à la distance** : L'annotation de base est la même. Seules les couleurs changent en fonction de la distance de proximité. Quand le véhicule qui précède est très près, l'annotation prend la couleur orange (Figure 45.c). Quand il est éloigné, la couleur verte est utilisée (Figure 45.a). Entre les deux, l'annotation prend la couleur jaune (Figure 45.b)

(a) (b) (c)

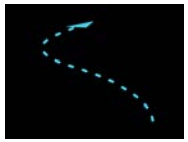
Figure 45 : Annotations pour le différentiel de distance. a) Véhicule « éloigné » , b) Véhicule moyennement éloigné. c) Véhicule très près

- **Les annotations liées à la vitesse** : L'annotation centrale est identique ; il s'agit d'une jauge. La couleur du remplissage de la jauge est fonction de la valeur du différentiel de vitesse : la jauge migre progressivement de la couleur rouge (quand le différentiel de vitesse est négatif, Figure 46.a) vers le vert (quand le différentiel de vitesse est positif, Figure 46.c) en passant par une phase de non remplissage quand le différentiel de vitesse est nul (Figure 46.b).

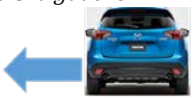
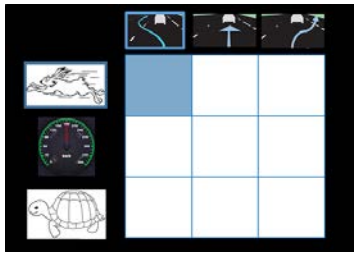
(a) (b) (c)

Figure 46 : Annotations pour le différentiel de vitesse. a) Différentiel de vitesse négatif. b) Différentiel de vitesse nul. c) Différentiel de vitesse positif

Tableau 26 : représentation des informations de niveau tactique et opérationnel selon les 4 fonctions « prise d'informations », « analyse de l'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action ». NB : EV= Ego-véhicule

	Prise d'information	**Analyse de l'information**	**Prise de décision**	**Implémentation de l'action**
Niveau tactique		❖ Différentiel de proximité ❖ Différentiel de vitesse entre l'EV et un autre véhicule (véhicule B) ▪ *Négatif* ▪ *Nul* ▪ *Positif* 	❖ Distinction entre la voiture cible et les autres véhicules ❖ Intention de l'EV de changer de voie  ❖ Décision de l'EV de changer de voie (a) ou abandon d'action (b) (a) (b) ❖ Raisons pour lesquelles l'EV fait le changement de voie *Indication de l'arrivée d'un véhicule de police derrière l'EV*	

			 ▪ *Indication de l'arrivée rapide d'un véhicule derrière l'EV* ▪ *Indication que l'EV arrive rapidement derrière un véhicule qui est plus lent* ▪ *Indication de la sortie que l'EV doit prendre* ▪ *Indication en bleu des voies que la VA doit prendre pour suivre l'itinéraire* 	
Niveau opérationnel	❖ Détection des véhicules ❖ Détection des	❖ Dimension de l'espace d'insertion de l'EV 		❖ Action courante de changement de voie de l'EV ❖ Différentes actions possibles de

	lignes de la voie ▪ *Dans une cuvette* ▪ *Dans une ligne droite* 	❖ Indication du changement de voie d'un autre véhicule ▪ *Vers la droite* ▪ *Vers la gauche* 		l'EV (tableau à 9 cases) 

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'architecture de l'automate intégré au simulateur DrSIHMI que nous avons utilisé dans nos travaux. Il est constitué de plusieurs modules qui permettent d'une part de réaliser les manœuvres en toute sécurité et d'autre part d'afficher les informations visant à le rendre transparent. Certaines d'entre elles nous ont conduit à modifier l'architecture du simulateur, en introduisant un module spécifique, le module décisionnel, qui a permis de fournir directement au superviseur IHM les raisons justifiant les manœuvres de changement de voie. Ce superviseur IHM est alimenté par près de 20 règles de supervision que nous avons complètement spécifiées. Celles-ci ont été développées par des informaticiens Valéo, collaborateurs dans le projet LRA.

Nous avons défini ensuite l'organisation et la représentation graphique des informations qui constituent la « grammaire visuelle » des IHM en réalité augmentée. Pour éviter le mélange des informations, l'organisation des afficheurs a été figée. Quant à la grammaire visuelle, elle a été déterminée grâce aux séances de créativité ; des tests ont été réalisés pour vérifier que les formes prises par les informations sont à la fois perçues et correctement comprises par les agents humains. Cependant, les premiers choix de représentation graphique issus de ces tests n'ont pas pu être tous développés à cause des contraintes techniques et temporelles liées au projet LRA. Grâce aux règles définies, les principes de transparence ont été testés et analysés. Le protocole expérimental et les résultats de cette expérimentation sont présentés dans la dernière partie de ce manuscrit.

Conclusion de la partie II

Les concepts théoriques présentés dans la première partie de ce manuscrit ont été contextualisés dans cette deuxième partie. Pour rappel, cette thèse s'inscrit dans un contexte de conception d'une interface de voiture autonome pour la rendre transparente. Afin d'atteindre cet objectif, cinq étapes ont été définies, dont les 4 premières ont été présentées dans cette deuxième partie du mémoire. Dans l'étape 1, des principes génériques de transparence ont été proposés. L'étape 2, quant à elle, a consisté à définir les besoins informationnels correspondant à chacun d'entre eux. Dans les étapes 3 et 4, les spécifications de l'automate et des IHM qui ont été produites et implémentées sur le simulateur, ont été présentées.

Dans l'étape 1, nous avons énoncé plusieurs principes de transparence pour la conduite automobile autonome en utilisant le modèle de LYONS (2013) comme modèle-cadre. Qu'il s'agisse du modèle de l'objectif général, de la tâche, de l'environnement, du modèle analytique, de la coopération et de l'agent humain, nous avons établi des correspondances avec la conduite autonome pour en extraire des exigences en termes de conception des interfaces. Ces exigences ont été traduites en principes. D'après nos recherches, il s'agit d'un premier essai de définition de principes de transparence pour la conduite automobile de façon générale et pour la conduite automobile autonome en particulier, sur la base d'un modèle théorique existant. Cependant, ces principes étant très généraux, il était nécessaire de les instancier en identifiant les besoins informationnels de l'agent humain.

C'est la raison pour laquelle, dans l'étape 2, nous avons utilisé la *Cognitive Work Analysis*. L'accent a été mis sur l'analyse du domaine de travail (*WDA*) et sur l'analyse de la tâche de contrôle (*ConTA*). Grâce à la Hiérarchie d'abstraction et la double échelle respectivement relatifs à la *WDA* et à la *ConTA*, une modélisation qualitative des informations a été proposée. Une originalité de cette modélisation a été la subdivision de l'échelle double en quatre régions correspondant aux quatre fonctions de PARASURAMAN ET AL. (2000) : « acquisition de l'information », « analyse de l'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action ». Si une modélisation similaire a été mise en œuvre par LI ET BURNS (2017) dans le domaine des finances, la modélisation que nous proposons est la première dans le domaine des transports de façon générale et dans le domaine de la conduite automobile en particulier. La démarche que nous avons utilisée est très proche de celle de REVELL ET AL. (2018) - l'UCEID (*User Centered Ecological Interface Design*) - qui a consisté à concevoir une interface écologique centrée sur l'utilisateur. Cependant, si l'UCEID suggère le déploiement de toutes les phases de la CWA, notre approche se contente des deux premières phases uniquement.

Si la définition des principes de transparence, précisées par l'application de la *Cognitive Work Analysis,* a permis de répondre à la question du « Quoi présenter ? » en conduite automobile autonome, il fallait répondre également aux questions « Quand présenter ? » et « Comment présenter ? »

Les réponses à ces deux dernières questions ont fait l'objet du deuxième chapitre de cette partie. Dans l'étape 3, nous avons présenté l'architecture de l'automate du simulateur et les modifications réalisées pour être en mesure de valider certains principes. Par ailleurs, nous avons présenté le superviseur IHM qui nous a permis de générer les règles d'affichage réglant la question du « Quand présenter ? » Ce superviseur permet notamment de gérer plusieurs règles simultanément, qu'il s'agisse des règles d'affichage ou des règles de représentation.

S'il est vrai que le contenu de l'interface est important, la façon dont ce contenu est représenté et communiqué à l'agent humain l'est tout autant. En effet, l'aspect graphique impacte la compréhension et l'acceptabilité de l'interface par l'agent humain. C'est dans cette optique que nous avons réalisé, dans l'étape 4, trois séances de créativité. La première séance, générale, a permis de définir des concepts de représentation en Réalité Augmentée. Les concepts

étant multiples, il fallait établir des choix. Pour que ces choix ne soient pas arbitraires, nous avons procédé à des tests de compréhensibilité et d'efficacité. Tandis que les premiers tests se focalisaient sur le caractère compréhensible d'un concept sur la seule base de la présentation d'un contexte de conduite, les seconds visaient à déterminer parmi plusieurs concepts lequel était le plus intuitif. Par un phénomène d'entonnoir, nous avons ainsi défini des représentations pour les informations associées à chaque principe de transparence, assurant ainsi la complétude de notre approche.

Pour résumer, dans cette deuxième partie, nous avons répondu à chacune des questions « Quoi présenter ? », « Quand présenter ? » et « Comment présenter ? » grâce aux étapes 1 à 4. Cependant, il importe désormais de mettre à l'épreuve ces principes d'un point de vue expérimental. En effet, il reste encore à répondre aux questions suivantes : les principes de transparence sont-ils tous validés ? Qu'est-ce qui peut expliquer leur validation ou leur infirmation ? Qu'en est-il de la surcharge informationnelle ? Répondre à ces questions constitue l'essentiel de la troisième partie qui présente le protocole expérimental ainsi que l'analyse des données recueillies lors des expérimentations.

Partie III
VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Introduction de la partie III

Dans la deuxième partie de ce mémoire, nous avons défini 12 principes de transparence applicables à la conduite autonome sur la base du modèle de LYONS (2013). Les deux premières étapes de la méthodologie *Cognitive Work Analysis* ont été utilisées pour instancier ces principes et définir les besoins informationnels du conducteur. Par ailleurs, des séances de créativité ont été conduites pour déterminer les représentations graphiques des IHM les plus appropriées afin qu'elles soient compréhensibles et intuitives pour les futurs conducteurs et que l'objectif de la validation soit focalisé uniquement sur les principes de transparence.

Dans la troisième partie de ce manuscrit, nous nous focalisons donc sur la validation expérimentale des principes de transparence que nous avons définis, ce qui constitue l'étape 5 de la démarche que nous avons présentée dans l'introduction de la partie II. Cette dernière partie comprend deux chapitres, le chapitre VI et le chapitre VII, qui présentent respectivement le protocole expérimental et les résultats obtenus.

Dans le chapitre VI, nous exposerons les particularités des cinq interfaces qui ont en effet été développées et testées et qui traduisent différentes configurations de transparence par « activation et désactivation » des différents principes énoncés. Le matériel, notamment le simulateur statique DrSIHMI, les scénarios, les différentes données qui ont été recueillies et les mesures réalisées seront également présentés. Les mesures ont porté sur la *Situation Awareness*, le sentiment de confort, la confiance et la préférence des participants pour l'une et l'autre des interfaces ; des entretiens d'explicitations (CAHOUR, SALEMBIER & ZOUINAR, 2016) ont également été menés pour identifier les informations utilisées par les participants dans les différentes conditions testées. Par ailleurs, des données oculométriques ont été enregistrées. Celles-ci ont déjà été utilisées dans d'autres travaux en conduite automobile pour évaluer la charge mentale des conducteurs (ICHIKI, AI, OOI & WAGATSUMA, 2016), leur attention (YOUNG, MACKENZIE, DAVIES & CRUNDALL, 2017) ou pour prédire leur prochaine manœuvre (PUGEAULT & BOWDEN, 2015). Nous avons utilisé ces données dans le but d'identifier d'éventuelles différences de stratégies visuelles en fonction du niveau de transparence des interfaces, en faisant l'hypothèse que l'activation ou la désactivation des principes associés les modifieraient. Nous avons donc eu recours à des données de différentes natures pour appréhender l'impact du niveau de transparence sur les activités cognitives des participants (prise et perception des informations, compréhension, anticipation) mais aussi sur l'expérience utilisateur (UX). Différentes facettes de l'expérience utilisateur (satisfaction, confiance, sentiment de confort, préférences) ont été mesurées dans le cadre d'une triangulation des méthodes (CRENO & CAHOUR, 2015) mise en œuvre pour pallier les erreurs qui pourraient être dues à l'utilisation d'une méthode unique (PATTON, 1999) mais aussi dans le but d'améliorer la richesse et la finesse de l'analyse (GUILBERT & LANCRY, 2007).

Le chapitre VII est consacré à l'analyse des données. Elle repose sur une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) qui a déjà été utilisée dans quelques travaux en conduite automobile notamment par CESTAC, PARAN ET DELHOMME (2014) et BILLOT-GRASSET, AMOROS ET HOURS (2016). Ce chapitre propose également une discussion des résultats obtenus. Il s'agit, in fine, de déterminer si les principes de transparence et les hypothèses opérationnelles sont ou non validés.

Chapitre VI. **Validation expérimentale : hypothèses et protocole**

I. Introduction

La phase d'évaluation est principalement guidée par les hypothèses qu'elle cherche à confirmer ou à infirmer. Dans notre cas, les principes de transparence applicables à la conduite autonome étant généraux, il a fallu les opérationnaliser. En d'autres termes, il a été nécessaire de traduire des hypothèses générales en hypothèses opérationnelles. Une fois que les hypothèses opérationnelles ont été énoncées, une question demeure : Comment s'assurer de tester convenablement ces hypothèses ? C'est la question à laquelle cherche à répondre le protocole expérimental.

Ce chapitre sera divisé en trois sections principales. Dans la section II, nous présenterons les hypothèses de travail que nous avons dérivées des principes de transparence. La section III sera consacrée au protocole expérimental. Nous présenterons les caractéristiques des participants auxquels nous avons eu recours pour notre expérimentation ainsi que les autres paramètres du protocole que nous avons utilisé. Nous présenterons la méthode d'analyse de données dans la section IV.

II. Interfaces et hypothèses

Le but de nos travaux est de valider ou d'invalider les principes de transparence définis dans le cadre de l'utilisation d'une voiture autonome de niveau 4 selon la taxonomie de la SAE et, par conséquent, d'évaluer le niveau de transparence optimal pour une interface de type HUD propre au projet LRA. Nous avons décidé pour cela d'activer ou désactiver l'affichage des informations associées à ces principes selon les quatre fonctions du traitement de l'information de PARASURAMAN ET AL. (2000) : « Prise d'information », « analyse de l'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action ». Seize niveaux de transparence différents peuvent être ainsi définis. Cependant, nous ne nous sommes focalisés que sur cinq interfaces parmi les 16, pour deux raisons principales :

- **Des contraintes temporelles.** Les ressources humaines liées au projet LRA étant limitées et le temps compté, il n'était pas possible de développer chacune de ces 16 IHM.
- **Des contraintes financières.** Avoir 16 IHM à évaluer impose de disposer d'un nombre important de participants pour pouvoir les valider. Les participants étant rémunérés et les ressources financières étaient limitées, nous avons choisi de n'en spécifier que 5.

Le Tableau 27 met en évidence les fonctions présentes dans chacune des IHM qui ont été retenues et développées.

Tableau 27 : Les spécifications des 5 IHM suivant les fonctions de Parasuraman et al. (2000). NB : « 1 » signifie que les informations en rapport avec la fonction sont présentes et «0» signifie qu'elles sont absentes.

	Prise d'information	Analyse de l'information	Prise de décision	Implémentation de l'action
In	0	0	0	0
Iw	1	0	0	1
Ii	1	1	0	1
Is	1	1	1	0
It	1	1	1	1

In ne contient aucune des informations issues des principes de transparence en rapport fonctions définies par PARASURAMAN ET AL. (2000) comme le montre le Tableau 27. Cependant elle n'est pas exempte d'informations. En effet, nous avons identifié des informations de base qui constituent cette interface et qui font d'elles l'interface de référence. Identifiées sur la base des analyses d'interfaces des véhicules récents en circulation et de certains prototypes de voitures autonomes, ces informations comprennent en particulier :

- La vitesse instantanée du véhicule autonome ;
- La vitesse limite définie pour le tronçon dans lequel se trouvait la voiture autonome ;
- L'indication que le mode autonome est actif ;
- La durée du mode autonome avant l'entrée dans une zone nécessitant une reprise en main ;
- La navigation : Elle n'est pas dynamique comme un GPS. Elle donne un aperçu sous forme de carte du trajet de la voiture autonome avec une indication du trajet local à emprunter en cas de séparation d'autoroute ou de sortie.
- Le blind spot : il indique la présence d'un véhicule dans l'angle mort du véhicule autonome.

Le Tableau 28 a été obtenu en mettant en correspondance les résultats issus de la CWA et les principes de transparence présentés dans le chapitre précédent. En ce qui concerne les évaluations des IHM, elles reposeront sur les différences observées lors de l'analyse des données. Ainsi,

1. Le différentiel entre *Iw* et *Ii* va permettre d'évaluer la plus-value des informations issues de la fonction « Analyse de l'information ».
2. Le différentiel entre *Ii* et *Is* va permettre d'évaluer la plus-value des informations issues de la fonction « Prise de décision ».
3. Le différentiel entre *Is* et *It* va permettre d'évaluer la plus-value des informations issues de la fonction « Implémentation de l'action ».

Pour chacun des principes retenus pour ce protocole, nous avons identifié les sorties correspondant à chaque fonction de PARASURAMAN ET AL. (2000), i.e. les informations à afficher sur les interfaces. Par exemple, pour le principe A1 du modèle analytique, les sorties correspondent uniquement à celles de la prise de décision. Il s'agit en particulier de la décision d'accélération, de la décision de décélération, de la décision de freinage. Le Tableau 28 présente l'ensemble de ces informations pour les principes T1, T2, T3, A1, A2, E1 et E2. Nous rappelons ci-après les principes que nous avons retenus pour l'évaluation expérimentale ; il s'agit des principes qui nous semblent les plus importants :

- Le **principe T1** : « *dans le mode autonome établi, le conducteur doit être informé que l'automate contrôle la voiture en respectant les règles et pratiques de la conduite en vigueur (prédictibilité du comportement de la voiture). Par ailleurs, le conducteur doit être capable de détecter les actions (changement de voie, maintien, changements de vitesse) en cours de réalisation par la voiture et les comprendre.* »
- Le **principe T2** : « *Dans le mode autonome établi, le conducteur doit être capable de percevoir l'intention de la voiture autonome (la manœuvre qu'elle va réaliser) et comprendre pourquoi cette manœuvre va être réalisée.* »
- **Le principe T3** : « *Dans le mode autonome établi, le conducteur doit être informé de toute manœuvre pouvant en interrompre une autre qui est en cours de réalisation (Changement de plan).* »
- Le **principe A1** : « *Dans le mode autonome établi, le conducteur doit savoir comment chaque manœuvre est réalisée.* »
- Le **principe A2** : « *Toute menace ou danger doivent être indiqués de façon spécifique.* »
- Le **principe E1** : « *Dans le mode autonome établi, le conducteur doit avoir une perception suffisante de ce que la voiture autonome perçoit pour effectuer ses analyses et prendre ses décisions. Il doit être assuré que la voiture autonome dispose des informations nécessaires à la prise de décision.* »
- Le **principe E2** : « *Il est important que le conducteur connaisse les limites des capteurs du véhicule, sachant qu'il peut lui-même voir des informations qui n'ont pas été perçues par ceux-ci.* »

Tableau 28 : Informations par fonction de chaque principe de transparence

Modèles	Principes	Prise d'informations	Analyse de l'information	Prise de Décision	Implémentation de l'Action
Modèle de la tâche	T1	▪ Vitesse limite dans la portion d'autoroute	-	-	▪ Action de changement de voie ▪ Décélération ▪ Accélération ▪ Maintien de vitesse
	T2	-	▪ Différentiel de vitesse avec les véhicules environnants	▪ Intention de changement de voie de l'égo véhicule ▪ Décision de changement de voie de l'égo véhicule ▪ Séparation d'autoroute à prendre par l'égo voiture ▪ Sortie d'autoroute à prendre par l'égo voiture ▪ Espace d'insertion suffisant dans la voie adjacente pour le changement de voie de l'égo véhicule ▪ Séparation d'autoroute ▪ Sortie à prendre	-
	T3	-	-	▪ Abandon d'intention de changement de voie ▪ Abandon de décision de changement de voie ▪ Espace d'insertion insuffisant dans la voie adjacente pour le changement de voie de l'égo véhicule ▪ Arrivée d'une voiture d'une voiture rapide à l'arrière de l'égo véhicule ▪ Arrivée de voiture prioritaire à l'arrière de l'égo véhicule	
Modèle analytique	A1	-	-	▪ Décision d'accélération	-

				▪ Décision de décélération ▪ Décision de freinage	
	A2	-	▪ Changement de voie d'une voiture de l'environnement ▪ Présence d'un obstacle sur la route	-	-
Modèle de l'environnement	E1	▪ Type de véhicules ▪ Position des véhicules environnants ▪ Vitesse des véhicules environnants ▪ Voie dans laquelle se trouve l'égo véhicule ▪ Topologie de la route ▪ Panneau de séparation d'autoroute ▪ Panneau de sortie d'autoroute	-	-	-
	E2	▪ Limites des capteurs de l'égo voiture			

Nous avons défini deux catégories d'hypothèses. Les premières concernent l'ensemble du scénario de conduite. Les secondes sont relatives à des scènes spécifiques du scénario.

II.1 Hypothèses relatives à l'ensemble du scénario de conduite

En conduite manuelle, les agents humains élaborent une représentation de la situation (*Situation Awareness*) sur la base d'éléments perçus, compris et sur la base de la projection de leur état futur. Cette représentation doit être pertinente, c'est-à-dire fournir les informations appropriées par rapport à la situation de conduite. Dans le cadre de la voiture autonome, les IHM que nous avons définies visent toutes à faciliter la perception mais aussi, pour certaines d'entre elles, la compréhension de la situation et la projection de son état dans un futur proche comme par exemple l'intention de changement de voie de la voiture autonome. Nous faisons donc l'hypothèse que le niveau de transparence des IHM va avoir une incidence sur la SA des conducteurs (**hypothèse 1**). Ces représentations différentes devraient être corrélées à des stratégies d'exploration visuelle différentes. En effet, si certaines informations ne sont pas directement accessibles (car affichées sur l'interface), on peut supposer que le conducteur sera amené à les rechercher. Ainsi, les temps de consultation des différentes zones d'intérêt ne seront pas les mêmes d'une IHM à l'autre (**hypothèse 2**). Cependant, à cause des règles formelles de conduite, nous pensons aussi que les conducteurs regarderont majoritairement devant eux. Les zones qui comportent les éléments de RA, devraient donc être les plus consultées (**hypothèse 3**).

L'IHM témoignant du comportement du véhicule autonome, celle-ci suscitera un niveau de confiance différent en fonction du niveau de transparence (**hypothèse 4**). Cette hypothèse n'est pas anodine car des auteurs tels Lyons et al. (2017) ont démontré qu'une augmentation de la transparence engendre une plus grande confiance de l'agent humain en l'automate. Par ailleurs, nous faisons également l'hypothèse que l'IHM la moins transparente ne sera pas la plus appréciée des agents humains et que ceux-ci auront une préférence pour les interfaces montrant clairement les actions que la voiture autonome réalise ou va réaliser (**hypothèse 5**). Par ailleurs, cette appréciation devrait être corroborée par le niveau d'inconfort qu'ils ressentent. En d'autres termes, *In* devrait générer le plus haut niveau d'inconfort comparativement aux autres IHM (**hypothèse 6**).

II.2 Hypothèses relatives à des scènes de conduite spécifiques

En conduite automobile, la gestion des interactions avec les autres usagers de la route s'inscrit dans un processus dynamique rapide où la prise de décision et l'implémentation de l'action sont parfois temporellement très rapprochées. Nous faisons donc l'hypothèse que dans des situations simples et habituelles telles que le suivi de voie, le besoin informationnel des agents humains est minimal ; la situation à gérer étant simple, ils ont besoin d'un faible nombre d'informations puisque l'automate a un comportement parfaitement prédictible (**hypothèse 7**).

En revanche, lors des situations de changement de voie, les agents humains seront attentifs au fait que l'automate a pris la bonne décision sur la base des informations perçues, de son analyse et qu'il implémente la bonne action. En d'autres termes, toutes les IHM présentant des informations relevant des fonctions « analyse de l'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action » permettront de mieux comprendre le comportement de l'automate que les autres interfaces dans ces situations (**hypothèse 8**). Par ailleurs, outre les informations présentées par les IHM, les agents humains évalueront le comportement de la voiture autonome sur la base des indices qu'ils auront prélevés eux-mêmes dans la situation

(**hypothèse 9**). Quand ce comportement ne sera pas conforme à ce qu'ils auraient fait dans leur véhicule, cela leur provoquera un inconfort (**hypothèse 10**).

Les hypothèses étant définies, nous présentons maintenant le protocole expérimental qui va permettre de les mettre à l'épreuve.

III. Le protocole expérimental

Dans cette section, nous présentons le protocole de l'expérimentation. Nous mettrons en évidence la manière dont l'échantillon de participants a été constitué, le matériel qui a été utilisé, les scénarios de conduite qui ont été développés ainsi que les différentes données recueillies et mesures utilisées.

III.1 Participants

45 personnes, classées selon la répartition du Tableau 29, ont pris part à l'expérimentation qui s'est déroulée dans le simulateur DrSIHMI[31]. La moyenne d'âge des 23 femmes était de $M_{age}^{f} = 42,63$ avec un écart type $\sigma^{f} = 9{,}23$; celle des hommes était de $M_{age}^{h} = 43,51$ et un écart type $\sigma^{h} = 9{,}53$. La durée en année de détention du permis était $M_{permis} = 22{,}4$; $\sigma_{permis} = 10{,}33$.

Tableau 29: Composition des participants suivant les critères "Genre" et "Age"

Sexe	Tranche d'âge	Nombre de personnes
Féminin	25-44 ans	13
	45-65ans	10
Masculin	25-44 ans	11
	45-65ans	11

Les critères indispensables au recrutement de ces participants étaient les suivants :

- **Critère 1** : Le participant devait conduire trois fois par semaine minimum, sur une durée d'au moins 15 minutes à chaque trajet, et ce depuis au moins un an.
- **Critère 2** : Le participant devait utiliser le régulateur de vitesse de son véhicule.
- **Critère 3** : Le participant devait choisir les réponses 3 ou 4 à la question suivante : « Que pensez-vous d'une voiture autonome (c'est-à-dire une voiture capable de conduire à votre place) ? »
    1. Ce n'est absolument pas rassurant et ne m'attire pas du tout.
    2. L'idée est intéressante mais je ne suis pas sûr(e) que ce soit vraiment fait pour moi.
    3. L'idée est intéressante et j'ai vraiment envie d'en savoir plus.
    4. J'adhère à 100%.
- **Critère 4** : Le participant ne devait présenter aucune des contre-indications médicales suivantes pour la conduite sur simulateur :
    - Nausées pendant les voyages ;
    - Mal des transports ;
    - Problèmes de vue non ou mal corrigés ;
    - Affections saisonnières dans les dernières 48h (gastroentérites, syndrome grippal) ;
    - Traitement pour problème cardiaque ou neurologique ;

31

- Prise de médicament habituel ou dans les 24 dernières heures pouvant altérer la vigilance ou la capacité à conduire ;
- Grossesse ;
- Problèmes d'audition ;
- Vertiges ;
- Pas de mascara pour l'utilisation de l'oculomètre.

Pour chaque participant, le test durait environ 2 heures, avec 40 minutes effectives en situation de roulage. Dans quelques cas, les deux heures ont été dépassées, notamment lorsque le participant s'exprimait plus longuement lors des entretiens d'explicitation menées après les passations. Quoiqu'il en soit, nous avions fixé la durée maximale du test à 2h30 lors du recrutement de chaque participant pour éviter toute fatigue. Cette limite a été respectée. Le Tableau 30 décrit le déroulement du test pour chaque participant.

Tableau 30 : Déroulement de l'expérimentation

Étape	Présentation du test		Roulage test	1er roulage	2ème roulage	3ème roulage	Clôture du test
Durée	15min	20min	10 min	25±5 min	20±5 min	20±5 min	5 min
Description	1.Remplissage des documents de confidentialité par les participants. 2.Remplissage du questionnaire sur les habitudes de conduite.	Présentation des objectifs de l'expérimentation sur ordinateur.	1. Présentation des afficheurs du simulateur. 2.Roulage 0 d'apprentissage avec le scénario de test et explications.	1.Calibration de l'oculomètre. 2.Roulage 1 durant lequel le questionnaire Q1 est posé. 3.Entretien d'explicitation 4.Questionnaire Q2.	1.Calibration de l'oculomètre. 2. Roulage 2 3.Entretien d'explicitation 4.Questionnaire Q2.	1.Calibration de l'oculomètre 2. Roulage 2 3.Entretien d'explicitation 4.Questionnaire Q2.	1.Remplissage du bordereau de livraison et rémunération 2.Remerciements

Au début du test, après avoir signé les chartes de consentement, chaque participant devait remplir un questionnaire (Q0) dans le but d'établir son profil. Ce questionnaire (présenté partiellement dans la Figure 47 et en intégralité en annexe 2) comprenait non seulement des questions à échelle linéaire analogique (en forte proportion), des questions fermées mais aussi des questions ouvertes réparties en quatre catégories inspirées du questionnaire utilisé par RAJAONAH (2006) dans le cadre de ses travaux sur la confiance de l'opérateur lors d'interactions avec une machine autonome :

- **Les habitudes proprement dites** : Elles regroupent le kilométrage parcouru par semaine, la vitesse moyenne pratiquée sur autoroute, la file préférentielle sur autoroute, la tendance à dépasser et la distance préférentielle par rapport au véhicule avant.

- **Les aspects psychologiques de la conduite habituelle** : le stress en conduite, l'anxiété en conduite, la patience dans les embouteillages et l'agressivité envers les autres usagers de la route.

- **L'auto-évaluation des compétences de conduite** : maîtrise de l'activité de conduite, dangerosité de la conduite pratiquée, distance de sécurité pratiquée, tendance à « coller » le véhicule situé devant et enfin prudence.

- **Les dimensions à connotation affective suivantes** : le caractère plaisant/déplaisant de l'activité de conduite, la responsabilité (soi ou les autres) et le caractère risqué de la conduite.

A-6 Etes-vous stressé lorsque vous conduisez ?
Jamais _____ Toujours

A-7 Comment caractérisez-vous votre conduite ? ***(entourer la réponse choisie)***
NERVEUSE NORMALE ECONOMIQUE

A-8 Avez-vous déjà conduit en simulateur ?
OUI ☐ NON ☐

Figure 47 : Quelques questions du questionnaire Q0

Les participants ont testé les IHM selon une répartition spécifique. Les scénarios ainsi que les IHM ont été contrebalancés. Le Tableau 31 présente les effectifs associés aux différentes IHM. On remarquera notamment, à la lecture de ce tableau, que tous les participants ont testé *In* qui est l'IHM de référence.

Tableau 31 : Répartition des participants par IHM

	Nombre de participants ayant testé
In	45
Iw	24
Ii	22
Is	21
It	23

III.2 Matériel

L'étude a été réalisée dans le simulateur de l'Institut de Recherche de Technologie System X, Dr SIHMI (Driving Simulator for Human Machine Interaction studies), Figure 48. Ce simulateur statique est constitué de :

- **Un cockpit de voiture** : Il comprend un volant, les pédales d'accélération, de frein et d'embrayage, un levier de vitesse, une boîte à boutons, un HUD « non RA », un HUD RA (avec Réalité Augmentée) et un écran déporté.
    - La « boîte » à boutons : permet au conducteur de manifester le degré d'inconfort ressenti au cours d'une situation en appuyant sur un bouton (bouton 1).
    - Le HUD non RA : Étant donné que DrSIHMI n'a pas de tableau de bord physique, cet afficheur, de dimensions 15x4°, permet l'affichage des informations classiques telles que la vitesse et le mode en cours.
    - Le HUD RA : Avec des dimensions 15x5° cet afficheur permet la projection d'informations virtuelles dans l'environnement de conduite pour une perception d'éléments de type Réalité Augmentée.

- L'écran déporté : contient les informations du niveau stratégique. Une image du parcours à suivre par le véhicule autonome, ainsi que la distance au point d'arrivée sont présentées sur cet écran.

- **Un écran de projection** courbe ayant une ouverture de 180°.

Figure 48: DrSIHMI

Dans ce contexte matériel, et afin de mener à bien l'expérimentation, plusieurs scénarios ont été développés.

III.3 Scénarios de conduite

Un scénario de conduite désigne une spécification de tous les événements pouvant survenir dans l'environnement. Il s'agit en particulier des manœuvres des véhicules composant le trafic, de la modification de la topologie de la route et des changements des conditions météorologiques. Dans le cadre de nos travaux, les scénarios ont été développés par des ressources techniques spécifiques sur la base des spécifications que nous avons fournies et grâce au logiciel SCANeR. Développé par OKTAL SA, SCANeR modélise les scénarios de façon graphique en utilisant des paires « Condition-Action » (« Si…, alors ») dans l'environnement de conduite (REYMOND, HEIDET, CANRY & KEMENY, 2000).

Les scénarios de conduite sont conçus comme une succession de scènes de conduite dans un environnement, ou terrain, donné. Dans le cadre de notre expérimentation, le terrain comporte :

- Une ligne droite 2x3 voies avec une limitation de vitesse à 130 km/h.
- Une première sortie (sur portion à 130 km/h).
- Un virage limité à 90 km/h.
- Une ligne droite, avec une limitation à 120 km/h.
- Une séparation d'autoroute : il s'agit d'une bifurcation en 2 fois 2 voies limitées à 120km/h.
- Une seconde sortie (sur portion à 130km/h). L'axe emprunté par la voiture autonome repasse à 3 voies avec 130 km/h pour vitesse maximale.
- Des panneaux de limitation de vitesse à des endroits définis.
- Des panneaux de sortie aux différentes sorties.

La Figure 49 montre une vue de dessus du terrain utilisé.

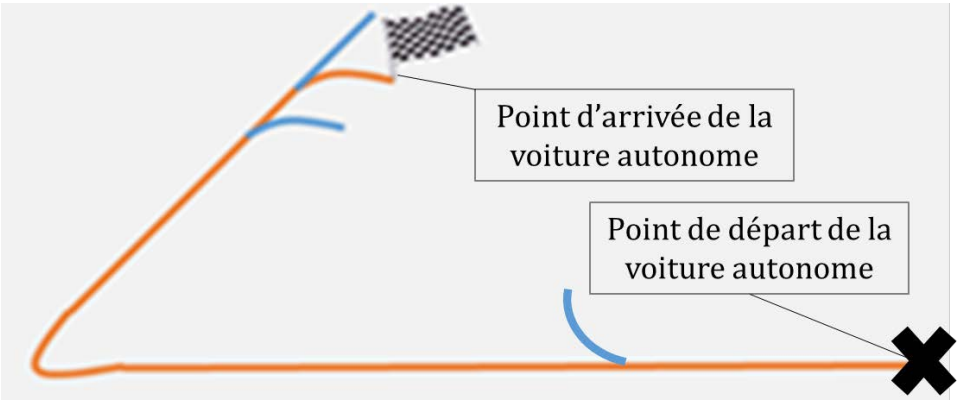


Figure 49 : Terrain utilisé lors de la simulation. Le trajet en orange est celui effectivement emprunté par la voiture autonome dans la simulation.

De façon générale, il est possible de définir trois types de scènes :

- Les scènes **normales** ;
- Les scènes **dangereuses** qui requièrent une attention particulière mais aucune intervention du conducteur ;
- Les scènes **critiques** qui nécessitent une intervention du conducteur pour éviter l'accident. Dans notre expérimentation, ce type de scènes n'a pas été utilisé car nous ne voulions pas inciter les participants à la reprise en main.

Dans le Tableau 32, nous présentons les différentes scènes qui ont été développées. Le trafic environnant a été contrôlé. Nous nous sommes en particulier assurés que :

1. Aucun véhicule ne circule sur la voie extrême gauche.
2. Aucun changement de voie ne soit réalisé vers la voie situé à l'extrême gauche.

Avant le début de chaque test, il a été précisé à chaque participant que la voiture autonome pouvait adopter des comportements longitudinaux différents en fonction des scènes. En effet, nous avons spécifié que le véhicule autonome pouvait avoir des accélérations et des freinages brusques, et qu'il pouvait parfois réduire les distances de sécurité sans que la sécurité s'en trouve affectée. Cette phase de présentation, faite sur ordinateur, visait principalement à respecter les principes issus du modèle de l'objectif général [32] présentés au chapitre IV. Ces principes visent à faire comprendre à l'agent humain ce qu'est la voiture autonome et ce qu'elle peut faire.

Faire varier l'ordre relatif de ces scènes a permis de définir quatre scénarios différents.

- **Le scénario 0** : Il durait 3 minutes 30. Il constituait le scénario d'apprentissage.
- **Les scénarios a, b et c** : D'une durée moyenne de 9 minutes, ces scénarios similaires (scènes de conduite identiques mais présentées dans un ordre d'enchaînement différent) constituaient les scénarios pour chaque roulage. Ils étaient associés à une des 5 IHM et soumis dans un ordre différent à chaque participant.

- Les scénarios de conduite étaient présentés aux participants suivant la répartition du Tableau 33.

[32] Ce modèle rappelle le but du système.

Tableau 32: Répartition des scènes suivant la distinction "normales" et "dangereuses »

Liste des scènes « dangereuses »	Liste des scènes normales
[3] Dépassement d'un camion roulant à 80km/h, 2s devant le véhicule autonome.	[1] Démarrage du véhicule autonome
[9] Dépassement d'un train de véhicules avec déboîtement d'un véhicule d'un train de véhicule.	[2] Suivi de voie dans une courbe
[11] Dépassement de deux poids lourds avec l'arrivée d'un véhicule de police.	[4] [6] [8] [10] [12] [14] [16] [18] [20] Suivi de voie
[15] Dépassement retardé à cause de deux véhicules empêchant le véhicule autonome de faire le dépassement.	[5] Dépassement de 3 véhicules prenant une sortie
	[7] Virage
	[13] Dépassement d'un train de 4 véhicules
	[17] Dépassements consécutifs de trois véhicules : l'un après l'autre.
	[19] Changement de voie du véhicule autonome à cause d'une séparation d'autoroute
	[21] Changement de voie à cause d'une sortie d'autoroute

Tableau 33 : Nombre de participants par IHM/scénario

IHM/scénario	*Sa*	*Sb*	*Sc*
In	15	15	15
Iw	8	8	8
Ii	8	7	7
Is	7	7	7
It	8	8	7

Au cours de chacun de ces scénarios, différentes mesures ont été effectuées.

III.4 Mesures

Dans le cadre de cette expérimentation, nous avons recueilli des données relatives aux activités cognitives des participants (prise d'information et *Situation Awareness*) d'une part, et à des éléments relevant de l'expérience utilisateur (confort vs inconfort, confiance, satisfaction) d'autre part.

a) Activités cognitives et Situation Awareness

La voiture fonctionnant en mode autonome, l'activité des participants relève plus de la surveillance que de la conduite. Il s'agit donc, essentiellement, d'une activité de prise d'informations visant à diagnostiquer d'éventuelles anomalies dans le fonctionnement de l'agent autonome. Pour appréhender cette activité, nous avons eu recours à trois types de données : des données d'oculométrie visant à appréhender les stratégies de prise d'informations, des données

verbales issues d'entretiens d'autoconfrontation et portant sur les éléments des IHM utilisés par les participants, et enfin un questionnaire relatif à l'évaluation de leur conscience de la situation.

i. Données oculométriques

De façon générale, il existe six types de mouvements oculaires (LEIGH & ZEE, 2006) :

1. Les fixations,
2. Les saccades,
3. Les poursuites douces,
4. Les réflexes optocinétiques permettant de suivre du regard un objet en mouvement,
5. Les réflexes vestibulo-oculaires permettant de compenser les mouvements de la tête pour maintenir le regard sur un objet,
6. La vergence qui est le mouvement simultané de chaque œil dans des directions opposées pour obtenir ou maintenir une vision binoculaire.

Plusieurs travaux en conduite automobile ont eu recours à l'oculométrie, en se focalisant notamment sur les fixations, les saccades et les poursuites douces ; ces dernières forment des séquences encore appelées chemins de balayage visuel (KASNECI, KASNECI, KÜBLER & ROSENSTIEL, 2015). Par exemple, en analysant les chemins de balayage, MOURANT ET ROCKWELL (1972) ont relevé que l'expérience joue un rôle dans la façon dont un agent humain analyse la scène de conduite. HAUER (1988) a montré que les stratégies oculaires peuvent fournir des indications sur les informations importantes pour un opérateur et sur son niveau d'attention notamment lors de situations spécifiques.

Si l'utilisation de l'oculométrie dans le domaine de la conduite manuelle est assez répandue, elle l'est beaucoup moins dans celui de la conduite assistée et autonome. Dans le cadre de la conduite assistée, SIMON, TAREL ET BREMOND (2009) se sont intéressés à la détection des panneaux routiers en exploitant la saillance visuelle et un classificateur SVM[33] non linéaire. Il y a très peu d'études qui analysent les mouvements oculaires des agents humains dans le mode autonome où l'automate assure les contrôles latéral et longitudinal. Comme MERAT ET AL. (2014), PETERMANN-STOCK, HACKENBERG, MUHR ET MERGL (2013) ont estimé le temps de reprise en main à 10s. Ce temps limité pour reprendre en main montre qu'il est important que l'agent humain soit dans la boucle de conduite en amont de la phase de reprise en main. En d'autres termes, il doit pouvoir identifier les informations les plus pertinentes de l'environnement et celles en rapport avec le comportement de l'automate. C'est la raison pour laquelle nous nous proposons d'évaluer l'impact de la transparence sur les mouvements oculaires.

Au cours de chaque roulage, les mouvements oculaires des participants ont été enregistrés à l'aide de lunettes « eye-tracker » SMI ETG 2w de SensoMotoric Instrument (SMI VISION) (Figure 50). Les lunettes sont livrées avec un enregistreur intégré dans un Samsung Galaxy Note 4. Ces lunettes, qui peuvent être utilisées de jour ou de nuit, échantillonnent les positions oculaires à 120Hz dans tout le champ de vision de la personne qui la porte. Les deux capteurs de ces lunettes permettent d'enregistrer :

- Une vidéo du paysage contenu dans le champ de vision de la personne qui les porte, obtenue grâce à une caméra.

[33] Support Vector Machine

- Des données oculométriques relatives aux mouvements oculaires, obtenues grâce à des capteurs infrarouges.

Le parcours du regard dans le champ vidéo permet de déterminer quelles sont les zones qui ont suscité l'attention visuelle. Par une définition des zones d'intérêt (*Area Of Interest*) et une analyse par zone d'intérêt fixe des fixations, des saccades, des clignements, ces lunettes permettent de savoir dans quelle direction une personne regarde, ce qu'elle regarde, et pendant combien de temps elle regarde une certaine zone.

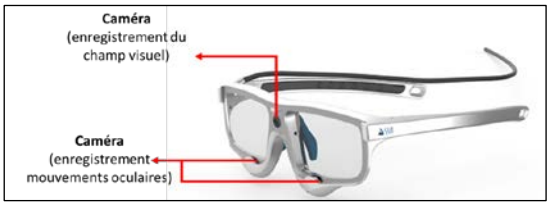


Figure 50: Lunettes SMI utilisées dans le cadre de l'expérimentation

Grâce à sa connectivité mobile et son temps de synchronisation au réseau, l'oculomètre SMI permet une faible latence de synchronisation avec la réalité virtuelle et ce avec une précision de quelques millisecondes. Cet oculomètre dispose d'un mécanisme de compensation de parallaxe automatique qui permet d'éviter des ajustements manuels. Les données binoculaires sont obtenues en temps réel. Le système est livré avec un package optionnel SMI— logiciel BeGaze— qui a été développé pour agréger les données par une analyse des zones d'intérêt de façon semi-automatique, sans utiliser des marqueurs actifs. Un exemple d'analyse réalisée par BeGaze est présenté Figure 51.

Figure 51 : Heat Map réalisée par BeGaze

Les fixations, les saccades ainsi que les clignements que nous avons recueillis, sont analysés automatiquement par le logiciel SMI Automated Semantic Gaze Mapping (ASGM). Il traite les données de tailles importantes, évite un travail manuel fastidieux, et offre un délai rapide de traitement des données. Les critères pour déterminer automatiquement les fixations sont ceux usuellement admis dans la littérature (DUCHOWSKI, 2007).

ii. Contenu perçu de l'IHM

Dans notre expérimentation, nous voulions évaluer l'influence du contenu d'une IHM sur la compréhension que le participant avait du fonctionnement de la voiture autonome. Pour ce faire, nous avons utilisé des entretiens d'explicitation (VERMERSCH, 1998A, 2000, 2001), et plus précisément les techniques permettant de faciliter une expression précise et exacte de la personne interrogée (LE VAN QUYEN &PETITMENGIN, 2002). Ces techniques incluent par exemple

l'évitement de l'induction des propos de la personne, c'est-à-dire l'évitement de l'interprétation directe ou indirecte de ses propos.

Les entretiens d'explicitation avaient pour but d'identifier les informations perçues par les utilisateurs ainsi que les stratégies de surveillance utilisées par chaque participant. Un problème a cependant été identifié dans les prétests : la difficulté des participants à se rappeler de leur expérience au cours d'une condition expérimentale (roulage) particulière. Cette difficulté était couplée à la difficulté d'immersion dans l'expérience passée. Pour tâcher de surmonter ces difficultés, nous avons modifié l'approche d'explicitation classique de façon similaire à REMILLEUX (2010) selon les étapes suivantes.

- **Étape 1 : Amorce**. Nous n'avons pas fait d'introduction stricto sensu au début de chaque entretien. En effet, au cours de la présentation générale du test, il avait été précisé au participant qu'il y aurait un entretien. L'introduction de cet entretien consistait en une question dite de « suscitation ». Nous l'avons formulée de la façon suivante : « *Comment s'est passé le roulage pour vous ?* » Elle se voulait volontairement générale pour permettre au participant d'exprimer d'emblée ses souvenirs les plus immédiats.

- **Étape 2 : Réponse du participant**. Le participant répondait à la question. Deux cas extrêmes pouvaient être observés :
  - Le participant ne parle pas et
  - Le participant parle trop.

  Dans le premier cas, nous lui disions que ce n'était pas grave pour le rassurer et qu'il ne se sente pas incompétent. Dans le second cas, nous tâchions de revenir sur le processus d'observation qu'il avait mentionné.

- **Étape 3 : Explicitation des éléments IHM perçus**. Quand le participant répondait, nous revenions sur les scènes qui l'avaient marqué et qu'il avait spontanément évoquées. Nous pouvions ainsi accéder aux éléments IHM perçus ainsi qu'aux stratégies d'observation utilisées. Pour éviter une fixation sur le comportement de la voiture autonome, nous avions recours à des redirections faites sous la forme suivante : « *Quand la voiture agissait ainsi, à quoi étiez-vous attentif ? Qu'avez-vous vu, entendu à ce moment-là ?* » Afin d'éviter des généralisations, nous avons orienté les réponses sur des scènes de conduite que nous avions répertoriées avant le test.

À côté du contenu informationnel obtenu au moyen des entretiens d'explicitations, nous avons également identifié le contenu vu par les participants au moyen d'un questionnaire post-roulage (questionnaire Q2). Ce dernier permettait aussi d'évaluer le sentiment de confiance de chaque participant à la fin de chaque roulage.

iii. Situation Awareness

Il existe plusieurs techniques pour évaluer la *Situation Awareness* parmi lesquelles SACRI[34] (HOOG ET AL., 1995), SALSA[35] (HAUSS & EYFERTH, 2003), SASHA[36] (JEANNOT, KELLY, &

[34] *Situation Awareness Control Room Inventory*.
[35] *Situation awareness of en-route air traffic controllers in the context of automation.*
[36] *Situation Awareness for SHApe*.

THOMPSON, 2003) SAGAT[37] (ENDSLEY, 1988), SART[38] (SELCON & TAYLOR, 1990), SARS[39] (WAAG ET HOUCK, 1994), SABARS[40] (MATTHEWS & BEAL, 2002), CARS[41] (MCGUINNESS & FOY, 2000), etc. Parmi ces méthodes, les plus populaires sont SAGAT et SART, notamment dans le domaine de la conduite automobile.

SAGAT a été validée et utilisée dans une grande variété d'applications et notamment dans le domaine de l'aviation (pour la conception d'IHM ou à des fins de formation) mais également dans le domaine maritime (CHAUVIN ET AL, 2008). En tant qu'outil de mesure global de la *Situation Awareness*, SAGAT comprend des questions portant sur les niveaux 1 (perception d'informations), 2 (compréhension de la situation) et 3 (projection de la situation dans l'avenir proche). Ces questionnements imposent que les missions et/ou simulations soient gelées. Les IHM sont masquées et la simulation est suspendue tandis que l'opérateur humain est invité à répondre à différentes questions. Les réponses sont ensuite comparées à des valeurs objectives, idéalement sur la base de données informatiques recueillies lors de la simulation, afin de fournir une mesure objective de la SA. Elles peuvent également (notamment pour les niveaux 2 et 3) être comparées à des valeurs que des experts jugent acceptables. L'utilisation de cette technique implique donc la connaissance du fonctionnement du système et du statut de tous les éléments de l'environnement extérieur.

SART est une méthode plus subjective. En effet, elle permet d'évaluer la *Situation Awareness* sur la base du ressenti des utilisateurs. Les opérateurs répondent à des questions subdivisées en 14 catégories considérées comme pertinentes par des experts. Les scores sont ensuite combinés afin d'obtenir un score global pour le système étudié. En phase d'évaluation des cockpits, des auteurs ont montré que ces scores étaient corrélés avec la performance de l'opérateur (SELCON & TAYLOR, 1990) ou avec les mesures subjectives de la charge de travail (SELCON, TAYLOR & KORITSAS, 1991).

Pour mesurer la *Situation Awareness*, il nous fallait donc faire le choix entre ces deux méthodes. Pour ce faire, nous avons synthétisé les caractéristiques de ces deux méthodes dans le Tableau 34 afin de mieux les comparer.

Tableau 34 : Comparaison de la SAGAT et de la SART

	Type de méthode	Utilisée dans les systèmes autonomes ?	Avantages	Inconvénients
SAGAT	Objective	Oui (VAN DEN BEUKEL ET VAN DER VOORT, 2013)	- Pas de biais dans la mesure.	- S'appuie sur la mémoire. - Intrusive. - Pourrait modifier les performances après le gel.

[37] *Situation Awareness Global Assessment Technique*.
[38] *Situation Awareness Rating Technique*.
[39] *Situation Awareness Rating Scales.* C'est une technique subjective développée dans le domaine militaire.
[40] *Situation Awareness Behaviorally Anchored Rating Scale.*
[41] *Crew Awareness Rating scale*. C'est une technique utilisée pour évaluer la Situation Awareness du commandant de contrôle. L'outil est composé de groupes de questions couvrant les 3 aspects de la SA définis Endsley.

SART	Subjective	Oui (STANTON, & YOUNG, 2005 ; VAN DEN BEUKEL ET VAN DER VOORT, 2013)	- Facile à utiliser. - Peut être déployée aussi bien en environnement virtuel que réel.	- Considère que les agents humains peuvent évaluer leur propre SA. - Probabilité non nulle de confondre la SA avec la charge de travail.

Le Tableau 34 montre que la SART et la SAGAT ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients. Par ailleurs, il n'existe pas de conclusions définitives sur le fait de savoir laquelle des deux méthodes est la meilleure. VAN DEN BEUKEL ET VAN DER VOORT (2013) ont montré que la SAGAT et la SART ne donnent pas des résultats contradictoires. Ainsi, l'une et l'autre peuvent être utilisées dans notre contexte. Nous avons choisi d'utiliser SAGAT pour sa facilité de mise en œuvre. Le questionnaire SAGAT (questionnaire Q1) a été utilisé uniquement lors du premier roulage, pour éviter tout effet d'apprentissage (Tableau 35).

Tableau 35: Questionnaire SAGAT

Niveau de la SA	Questions SAGAT
Niveau 1 : Perception	G1. Quelle est l'action de votre véhicule ? a. Suivi de voie b. Changement de voie vers la gauche c. Changement de voie vers la droite G2. Quelle est la dynamique de votre véhicule ? a. Accélération b. Décélération c. Vitesse constante G5. Combien y avait-il de voitures devant le véhicule autonome ? 0 1 2 3 4 G6. Combien y avait-il de voitures derrière le véhicule autonome ? 0 1 2 3 4
Niveau 2 : Compréhension	G3. Le véhicule est-il en-dessous de la vitesse légale ? Oui Non
Niveau 3 : Projection	G4. Quelle est l'action à venir de votre véhicule ? a. Suivi de voie b. Changement de voie vers la gauche c. Changement de voie vers la droite

À cause de leur caractère volontairement « dangereux », les scènes de conduite [9] et [11] ont été sélectionnées comme les deux scènes dans lesquelles se faisaient les gels. Dans la scène [9], la voiture autonome fait un changement de voie pour dépasser un train de 3 véhicules et alors qu'il est sur la voie du milieu, un de ces véhicules déboîte subitement devant lui. Dans la scène [11], la voiture autonome dépasse deux poids lourds dans un contexte de trafic chargé.

Afin d'éviter tout biais, un contrebalancement a été fait entre les deux scènes d'un participant à l'autre. Concrètement, si le participant X avait un gel dans la scène [9], le participant Y l'avait dans la scène [11]. Le nombre de réponses correctes reflétait la *SA* des participants. De façon équivalente, le nombre de mauvaises réponses reflétait une SA insuffisante (cf. chapitre II). Cependant, pour être plus précis, il faut également s'intéresser à la nature de cette lacune. Relève-t-elle plutôt de la perception ? De la compréhension ou de la projection ?

b) Expérience utilisateur

L'expérience utilisateur est de plus en plus perçue comme un facteur-clé pour le succès de tout produit (MINGE, THÜRING, WAGNER & KUHR, 2016). Dans cette perspective, développeurs et concepteurs s'attèlent à produire des expériences positives en évitant des impressions négatives en fonction de leur produit. La norme ISO 9241-210 dans sa version de 2009, définit l'expérience utilisateur comme l'ensemble des perceptions et des réponses de l'utilisateur qui résultent de l'utilisation (anticipée ou pas) d'un produit, d'un système ou d'un service. Selon la même norme, l'expérience utilisateur inclut leurs émotions, leurs croyances, leurs préférences, leurs perceptions. Elle se mesure par des questionnaires ou par d'autres techniques avant, pendant et après l'utilisation. C'est la raison pour laquelle nous nous sommes intéressés à trois paramètres en particulier : le sentiment d'inconfort des participants, leur sentiment de confiance et leur satisfaction.

i. Le sentiment d'inconfort

Dans le cadre de la Coopération Homme-Machine, si la notion de « confiance » en l'automatisation est largement traitée (cf. chapitre III), celle d'« inconfort » l'est beaucoup moins (FUJIHARA, OIKAWA & MURAYAMA, 2008 ; AWAD & FITZGERALD, 2005). Une consultation des travaux en psychologie cognitive permet de définir cette notion, qui est fortement corrélée à celle de « cohérence ». En général, les êtres humains ont une préférence pour des pensées, des sentiments et comportements qui s'accordent les uns avec les autres, c'est-à-dire qui sont cohérents (HEIDER, 1946). Le manque de cohérence, perçu comme déplaisant, peut entraîner un sentiment d'inconfort. L'inconfort peut être physique ou cognitif. Dans le premier cas, il s'agit d'un sentiment de mal-être physique (LEWIS, SIEGEL & LEWIS, 1984). Dans le deuxième cas, l'inconfort fait intervenir un ensemble de processus cognitifs conflictuels (VAN HARREVELD, RUTJENS, ROTTEVEEL, NORDGREN, & VAN DER PLIGT, 2009). Nous nous focaliserons sur ce dernier type d'inconfort.

En psychologie cognitive, les recherches révèlent que les agents humains agissent pour réduire les incohérences qui sont génératrices de déplaisir. C'est par exemple ce que montrent les travaux de CROYLE ET COOPER (1983) sur la dissonance cognitive. Ceci laisse suggérer que dans la cognition humaine, « déplaisant » et « inconfortable », qualificatifs d'émotions négatives, peuvent être appréhendés comme des synonymes. Dans leurs travaux, JONAS, DIEHL ET BRÖMER (1997) ont suggéré que l'incertitude est déplaisante et que les agents humains tendent à la limiter. Les travaux de FUJIHIRA ET AL. (2008) dans le domaine des interfaces permettent de mettre en exergue d'autres facteurs d'inconfort. Leur objectif étant de concevoir des interfaces qui génèrent expressément un sentiment d'inconfort [42]chez les utilisateurs, ils mettent en évidence 7 facteurs significatifs :

1. Le fait que l'interface soit compliquée ;

[42] Les auteurs optent pour ce principe de conception pour identifier a posteriori les principes à respecter dans la conception pour obtenir une interface confortable.

2. La difficulté de trouver une information ;
3. Le fait que des messages intermittents soient délivrés par l'interface ;
4. L'occurrence d'événements imprévus (les défaillances en particulier) ;
5. La difficulté de voir une information à cause de son format ;
6. Le temps d'attente pour recevoir une information ;
7. L'occurrence de sons inattendus ou dérangeants.

Dans le cadre de notre expérimentation, nous avons étudié l'inconfort en rapport avec les facteurs 1, 2 et 4, corrélés à l'incertitude. Nous faisons en particulier l'hypothèse qu'un participant qui n'est pas certain de la décision que va prendre la voiture autonome dans une situation donnée, aura un sentiment d'inconfort, comme l'ont montré VAN HARREVELD, RUTJENS, ROTTEVEEL, NORDGREN ET VAN DER PLIGT (2009).

La question de la mesure de ce sentiment n'est pas triviale. Dans la littérature, les questionnaires sont le moyen le plus couramment utilisé (VAN HARREVELD ET AL., 2009 ; FUJIHARA ET AL., 2008). Étant donné que les participants ne conduisaient pas, nous avons opté pour un moyen un peu plus « intrusif » en mesurant le sentiment d'inconfort avec des boutons de manière similaire à HARTWICH, BEGGIATO ET KREMS (2018). Quand le participant avait un sentiment d'inconfort, il avait la possibilité d'appuyer sur un bouton (bouton 1) qui devenait rouge. Si ce sentiment s'accentuait, le participant pouvait appuyer plusieurs fois sur ce bouton. Le nombre d'appuis sur le bouton d'un roulage à l'autre, et donc d'une IHM à l'autre, permettait d'évaluer le sentiment d'inconfort suscité par cette IHM.

Indépendamment du sentiment d'inconfort, nous avons cherché à évaluer le sentiment de confiance ressenti par les participants.

ii. Le sentiment de confiance

La confiance qu'a un agent humain dans un système automatisé (autonome) conditionne son appropriation (cf. chapitre III). Parmi les moyens d'évaluer la confiance, les plus utilisés sont :

- Le **nombre de mouvements réalisés** par le participant (GRAFSGAARD., FULTON, BOYER, WIEBE., & LESTER, 2012) : Il s'agit de relever en particulier les mouvements de la tête, de la main et des pieds sur la base d'une vidéo. Un nombre élevé de mouvements révèle des sentiments négatifs. Cependant, le nombre de mouvements n'est pas toujours corrélé aux fluctuations de la confiance (WRIGHT, HORREY, LESCH & RAHMAN, 2016). Par ailleurs, cette mesure est coûteuse en temps.

- Les **questionnaires** (BISANTZ & SEONG, 2001 ; WRIGHT ET AL., 2016) : C'est la méthode la plus utilisée. Pour chaque question relative à un aspect de la confiance, la réponse est donnée sous la forme d'une échelle de Likert comme dans les travaux de WRIGHT ET AL. (2016), ou à l'aide d'une échelle analogue linéaire. En fonction de la façon dont la question est présentée au participant, un score peut renvoyer à un sentiment de confiance ou pas.

Les travaux ayant eu recours au nombre de mouvements comme mesure de la confiance n'ayant pas conduit à des résultats significatifs, c'est un questionnaire qui a été utilisé dans notre expérimentation. Ce choix a été conforté par le fait que des auteurs comme LYONS ET AL. (2017) qui ont travaillé sur l'évaluation de la confiance en fonction du niveau de transparence, y ont également eu recours. A chacune des questions posées comme "I would feel comfortable relying the recommendations of the [ACFP] (*Autonomous Constrained Flight Planner in the future*)", LYONS ET AL. (2017) ont demandé aux participants d'y répondre, après chaque condition

expérimentale, en utilisant une échelle de Likert à 7 niveaux. L'échelle analogue linéaire avec alternance de valence, qui correspond à une règle d'évaluation a été privilégiée pour éviter la systématisation des réponses.

Finalement, nous avons cherché à évaluer la satisfaction de chaque participant à la fin des trois roulages.

iii. La satisfaction des participants

Dans le domaine de la consommation énergétique, SHAHZAD, BRENNAN, THEODOSSOPOULOS, HUGHES ET CALAUTIT (2015) définissent la satisfaction d'un utilisateur comme un indicateur pour savoir si cet utilisateur aime utiliser un produit ou un service. La satisfaction est considérée comme un facteur susceptible de favoriser l'utilisation d'un produit (POWERS & DICKSON, 1973) alors que dans le cas contraire, il aura tendance à ne pas l'utiliser ; plusieurs études démontrent ce résultat. Par exemple, dans le domaine de la domotique, les travaux de MEERBEEK, KULVE, AARTS, VAN LOENEN ET AARTS (2014) et BRUSH ET AL. (2011) ont montré qu'un manque de satisfaction chez les utilisateurs, engendré par un faible contrôle sur les fonctions assurées par les systèmes automatisés de leur maison, peut engendrer une non-utilisation[43] de ces systèmes. Pour appréhender la satisfaction d'un utilisateur, la préférence peut être considérée comme un indicateur (SMALL, ANDERSON, VICKERS, KAY, & FERMER., 2011). En effet, plus un individu préférerait un produit à d'autres, plus il serait plus satisfait par ce produit contrairement aux autres.

Si l'importance de la satisfaction (et donc de la préférence) d'un agent humain dans l'utilisation d'un système produit et/ou service est claire, le défi consiste à la mesurer convenablement. La littérature présente quelques moyens d'y parvenir. On peut citer entre autres les questionnaires (NEUMANN & SEGEV, 1980 ; NOLAND & SEWARD, 1974) ou bien des techniques de classement (VON SCHANTZ, KATAJAVUORI, ANTIKAINEN & JUPPO, 2016).

Dans notre expérimentation, nous avons utilisé une approche similaire à celle de VON SCHANTZ ET AL. (2016). En effet, après avoir expérimenté les 3 IHM, chaque participant devait les classer. Une question de clôture a été formulée de la façon suivante : « Parmi les trois IHM, laquelle avez-vous préférée ? Veuillez les classer ».

Nous attendons donc des différentes mesures retenues qu'elles permettent d'accéder aux activités cognitives des participants (prise d'informations) et à l'état cognitif qu'est la *Situation Awareness* mais aussi à leur expérience (au travers des mesures de la confiance, du confort versus inconfort et des préférences énoncées). Dans la partie suivante, nous présentons les méthodes utilisées pour traiter les différentes données recueillies

[43] Pour pallier ce problème, certains auteurs ont suggéré une autonomie flexible, c'est-à-dire la possibilité pour chaque utilisateur d'ajuster le niveau d'automatisation en fonction de ces desiderata (BRADSHAW ET AL., 2003 ; TAMBE, SCERRI & PYNADATH, 2002).

IV. Analyse des données

IV.1 Analyse des données non-verbales

Les variables étudiées dans cette expérience sont de différents types et de différentes natures (quantitatives et qualitatives). De façon classique, nous avons mesuré des variables indépendantes et des variables dépendantes. Parmi les variables indépendantes, nous distinguons les variables invoquées (inhérentes aux participants) et les variables provoquées que nous avons manipulées.

Pour faciliter le traitement des données recueillies, ces variables ont été codées pour obtenir des sigles. Le Tableau 36 présentent l'ensemble des variables étudiées ainsi que leurs valeurs possibles (pour les variables quantitatives discrètes) ou leurs modalités (pour les variables qualitatives).

Tableau 36 : Variables utilisées dans la démarche expérimentale

Type de variables	Labels	Description	Intervalle de valeurs ou modalités
Variables indépendantes invoquées	**P**	Participant	Abréviations des noms des participants
	G	Genre (Gender)	F (femme); M (homme).
	A	Age	[26; 64]
	DM	Gestion de la distance (*Distance Management*)	[0 ; 10]
	CL	Niveau de contrôle (*Control Level*)	[0 ; 10]
	EL	Niveau d'effort (*Effort Level*)	[0 ; 10]
	PL	Niveau de prudence (*Prudence Level*)	[0 ; 10]
	SU	Simulator Use	Y (Oui); N (Non)
Variables indépendantes provoquées	**F**	Gel (*Freeze*)	1 (présence); 0 (absence)
	DN	Roulage (*Driving number*)	1, 2 or 3.
	I	Interface	*In* (IHM 1), *Iw* (IHM 2), *Ii* (IHM 3), *Is* (IHM 4) et *It* (IHM 5)
	S	Scénario de conduite (*Driving Scenario*)	a, b, c.
	Sc	Scène de conduite où il y a eu utilisation de la méthode SAGAT	9 or 11
Variables dépendantes	**O**	Données oculométriques	
	G1 to G6	Réponses aux questions SAGAT	1 (Correcte); 0 (Fausse)
	BP	Nombre d'appui bouton (*Button Pushes*)	
	C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C10	Réponses aux questionnaires Q2 d'évaluation de l'interface	[0 ; 10]
	C8 and C9	Réponses aux questions d'évaluation de l'interface	Y (Oui, *Yes*), N (Non, *No*)
	FI	Interface classée en première position (*First Interface*)	*In* (IHM 1), *Iw* (IHM 2), *Ii* (IHM 3), *Is*

			(IHM 4) et *It* (IHM 5)
	SI	Interface classée en deuxième position (*Second Interface*)	*In* (IHM 1), *Iw* (IHM 2), *Ii* (IHM 3), *Is* (IHM 4) et *It* (IHM 5)
	TI	Interface classée en troisième position (*Third Interface*)	*In* (IHM 1), *Iw* (IHM 2), *Ii* (IHM 3), *Is* (IHM 4) et *It* (IHM 5)

Les variables DM, CL, EL et PL désignent respectivement :

- La manière dont le participant gère la distance de sécurité avec le véhicule qui le précède dans la vie de tous les jours (distance peu sécuritaire vs très sécuritaire).
- Le niveau de contrôle de l'environnement de conduite (contrôle vs conduite à la merci des autres).
- Le niveau d'effort que ça coûte au participant de conduire (gros effort vs pas d'effort).

Les variables dépendantes ont été recueillies à des moments différents (Figure 52) :

- Les réponses au questionnaire Q1 de la *Situation Awareness* ont été recueillies uniquement dans le premier roulage (DN 1), au cours de l'une des scènes [9] ou [11]. Elles ont pour but d'évaluer la *Situation Awareness*.
- Les réponses aux questionnaires d'évaluation des IHM (C) ont été recueillies à la fin de chacune des trois conditions expérimentales (DN 1, DN 2 et DN 3). Elles ont pour but d'évaluer l'efficacité des IHM et d'enregistrer les informations effectivement perçues.
- Le classement des IHM en première, deuxième et troisième position (respectivement FI, SI, et TI) a été recueilli à l'issue de la troisième condition expérimentale (DN 3). Ce classement a pour but d'évaluer l'acceptabilité des IHM.
- Le nombre d'appuis bouton (BP) a été recueilli pendant chacune des trois conditions expérimentales (DN 1, DN 2 et DN 3). Ce nombre vise à évaluer le sentiment d'inconfort.
- Les données oculométriques (O) ont été recueillies pendant chacune des trois conditions expérimentales (DN 1, DN 2 et DN 3). Elles visent à définir et à comparer les stratégies visuelles pour chaque IHM.

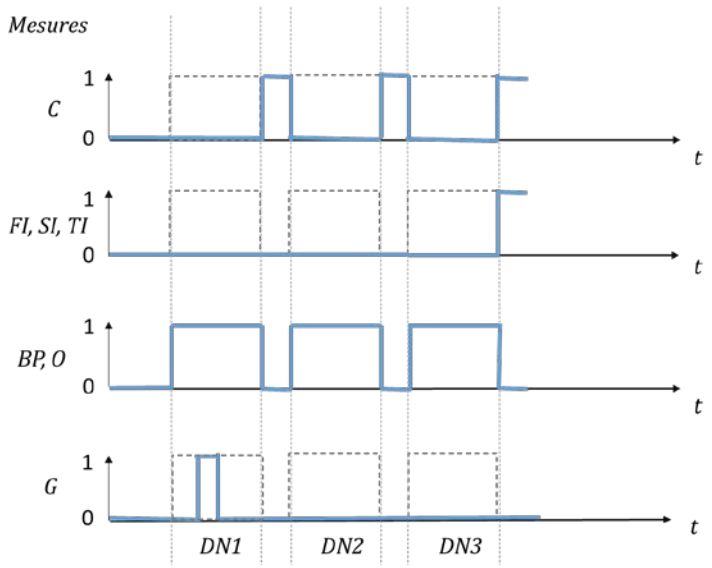


Figure 52 : Moments de recueillement des différentes mesures, (DNi : roulage N° i).

Dans la validation expérimentale, nous avons manipulé 4 variables indépendantes ou « facteurs » : le roulage (DN), l'interface (I), le gel de la situation (F) et le scénario de conduite (S). Par ailleurs, il y avait des facteurs contrôlés (ou variables indépendantes) issus du questionnaire Q0 sur les habitudes de conduite tels que l'âge des participants et leur genre. Cette validation a quatre objectifs :

- Objectif 1 : Étudier les relations entre les facteurs contrôlés.
- Objectif 2 : Étudier les effets des variables indépendantes sur les variables dépendantes.
- Objectif 3 : Étudier les relations entre les variables mesurées.
- Objectif 4 : Étudier les effets des variables contrôlées sur les variables mesurées.

La Figure 53 synthétise les différentes variables dépendantes et indépendantes de la validation expérimentale montée.

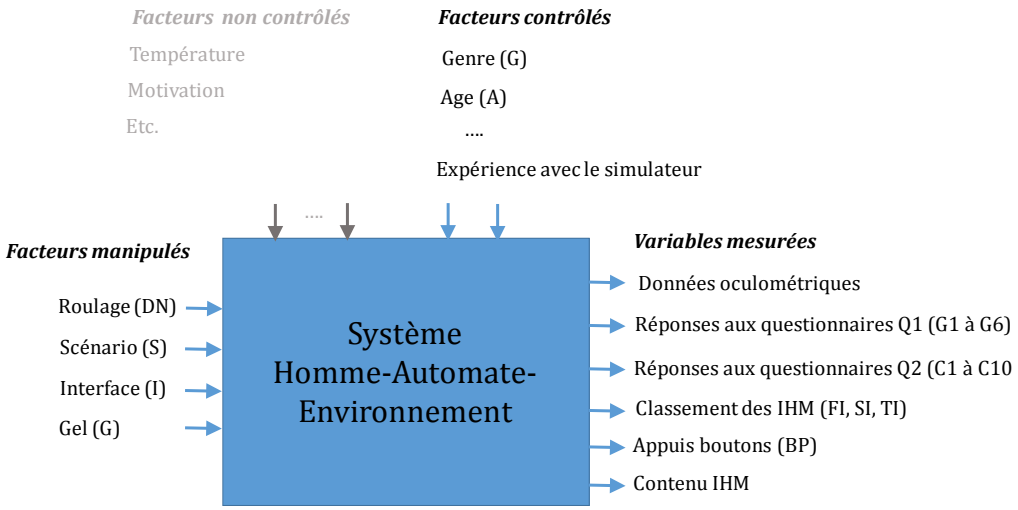


Figure 53 : Actigramme de la validation expérimentale.

Puisque plusieurs variables ont été mesurées, celles-ci ont toutes été considérées par le biais d'une approche multivariée, au lieu de réaliser plusieurs fois des analyses univariées. Dans la famille des outils d'analyse multivariée, on trouve les classifications et les techniques de

regroupement (JOHNSON & WICHERN, 2007). Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous avons opté pour les classifications parce qu'elles présentent l'avantage de montrer « facilement » les relations entre les variables et les effets de chacune des variables (BENZECRI, 1992 ; SCHIRO ET AL. 2015). La présence des variables quantitatives et des variables qualitatives nous a conduit à utiliser l'Analyse à Correspondance Multiple (ACM), à la place de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) généralement utilisée (BENZECRI, 1992).

Si l'ACM est plus utilisée dans l'analyse des variables qualitatives, en particulier dans les questionnaires à Choix Multiples ou de données d'enquête (BENZECRI, 1992 ; CESTAC ET AL., 2014 ; BILLOT-GRASSET ET AL. 2016), il est important de relever qu'elle permet, avec des variables quantitatives codées de façon floue, de montrer les relations non linéaires. Par conséquent, les modèles qui y sont utilisées sont plus complexes que ceux de l'ACP (BENZECRI, 1992 ; LOSLEVER, 2014 ; LOSLEVER ET AL., 2017). Pour une première analyse, le Modèle de Fuzzification (MF) est adopté pour les moyennes arithmétiques et les intervalles de valeurs. Le MF est moins sensible aux valeurs extrêmes (des valeurs parfois erronées) parce que la moyenne ajustée est moins sensible aux valeurs aberrantes que la moyenne arithmétique (RICE, 1969). Avant d'aller plus loin, nous nous attarderons sur les considérations suivantes :

- **Considération 1** : Pour évaluer les facteurs d'impact, une opération de synthèse est nécessaire. Cette nécessité de synthèse conduit à une perte d'information plus faible avec un fenêtrage local que sans (LOSLEVER, 2001 ; LOSLEVER ET AL., 2003 ; LOSLEVER ET AL., 2017 ; SCHIRO, LOSLEVER, GABRIELLI, & PUDLO, 2015).
- **Considération 2** : Il existe d'autres modèles de changement d'échelle mais celui-ci offre de bons résultats (voir LOSLEVER, 2014 pour des études comparatives).
- **Considération 3** : Chaque histogramme et sa fenêtre correspondante ont été soigneusement vérifiés.

Des applications de l'ACM dans le domaine des transports existent (CLOSTERMANN & LANGARD, 2013 ; CESTAC ET AL., 2014 ; BILLOT-GRASSET, AMOROS, & HOURS, 2016) avec des variables qualitatives (LOSLEVER ET AL., 2017) et avec des variables quantitatives fuzzifiées. Nous avons procédé, dans le cadre de la présente étude, en deux étapes :

- **Étape 1 : Le traitement des facteurs contrôlés.** Parmi toutes les variables intrinsèques à chaque participant, nous en avons sélectionné 7 : le genre (G), l'âge (A), l'utilisation antérieure d'un simulateur (SU, ce facteur consistait à identifier si le participant avait déjà utilisé un simulateur dans sa vie), la gestion de la distance (DM), le niveau de contrôle de l'environnement de conduite (CL), le niveau d'effort (EL) et le niveau de prudence (PL). Un exemple didactique avec ces 7 variables est présenté en annexe 5.
- **Étape 2 : Le traitement des variables de dimensionnement de l'expérimentation**. Il s'agit de deux types de variables :
    - Les variables indépendantes retenues (quelques-unes en effet ont été sélectionnées parmi toutes celles qui étaient présentes) dans chaque condition expérimentale sont : le roulage, l'interface, le scénario de conduite et le gel.
    - Les données recueillies au cours de chaque condition expérimentale « définies » pour chaque participant sont : le nombre d'appuis boutons, les réponses au questionnaire Q1 sur la *Situation Awareness,* les réponses au questionnaire Q2 posé après chaque roulage, le classement des IHM fait à la fin des trois roulages et les données oculométriques enregistrées au cours de chaque roulage. Étant donné que toutes ces variables n'étaient pas mesurées à chaque roulage, il n'y avait pas 135 (= 45 participants x 3 roulages) jeux de données pour chaque mesure.

Nous présentons le traitement des données verbales dans les lignes suivantes.

IV.2 Analyse des données verbales

L'analyse des données verbales porte généralement sur leur contenu. ROBERT ET BOUILLAGUET (1997) précisent que l'analyse de contenu consiste à appliquer, au corpus de données, des traitements pour répondre à une problématique initiale. Généralement, cette phase revient à procéder à des codages, des décomptes et/ou des énumérations. Elle comprend deux étapes complémentaires :

- Étape 1 : Dans cette première étape, une grille de catégories est élaborée. Selon BARDIN (1977), une grille de catégories est un ensemble de *« rubriques rassemblant des éléments ayant des caractères communs sous un titre générique, et en la classification des données du corpus dans celles-ci »*. À ce niveau, les données brutes sont représentées de manière simplifiée grâce à une classification qui permet de faire des différenciations et/ou des analogies. Cette étape exige donc un effort d'identification des thèmes, de construction d'hypothèses (idées) émergeant des données ainsi que de clarification du lien entre les données, les thèmes et les hypothèses conséquentes (TESCH, 1990).

- Étape 2 : Dans cette deuxième étape, la grille qui a été définie dans la première étape est appliquée au corpus pour procéder au codage/comptage des unités. Selon ROBERT ET BOUILLAGUET (1997, P. 30), deux types d'unités sont à différencier : i) l'unité d'enregistrement qui correspond au « *segment déterminé de contenu que le chercheur a décidé de retenir pour le faire entrer dans la grille d'analyse* » et ii) l'unité de numération qui correspond à « *la manière dont l'analyste va compter lorsqu'il a choisi de recourir à la quantification ; l'unité de numération correspond donc à ce qu'il compte* ».

Après la classification des données et le codage, l'étape suivante consiste à les traiter pour leur accorder un certain niveau de significativité et de validité. Les traitements statistiques peuvent être simples comme le calcul des pourcentages ou plus complexes comme des analyses factorielles. Des tests de validité peuvent être réalisés pour leur accorder davantage de significativité et faire des interprétations des résultats en rapport avec les objectifs initiaux de la recherche. Pour ROBERT ET BOUILLAGUET (1997, P. 31), interpréter les résultats revient à « *prendre appui sur les éléments mis au jour par la catégorisation pour fonder une lecture à la fois originale et objective du corpus étudié* ».

De manière générale, dans l'analyse de contenu, il s'agit donc de rassembler ou des recueillir un corpus d'informations concernant l'objet d'étude, de le trier selon qu'il y appartient ou non, de fouiller son contenu selon ses ressemblances « thématiques », de rassembler ces éléments dans des classes conceptuelles, d'étudier les relations existantes entre ces éléments et de donner une description compréhensive de l'objet d'étude. Dans notre cas, les données ont été organisées selon trois catégories : i) l'environnement, ii) les connaissances propres et iii) la voiture autonome. Par ailleurs, lorsque les jugements de valeur méliorative ou péjorative ont été émis concernant l'une ou l'autre de ces données, ils ont été consignés. Par ailleurs, quand les éléments de l'IHM ont été évoqués, ils ont été enregistrés afin de voir la différence entre les IHM du point de vue des participants. Les traitements statistiques ont été réalisés grâce à l'analyse des correspondances multiples.

.

V. Conclusion

La méthodologie d'évaluation que nous avons utilisée dans notre expérimentation se distingue des autres méthodologies à plusieurs niveaux : taille de l'expérimentation, plan d'expérience et environnement de simulation. Au niveau **de la taille de l'expérimentation**, notre méthodologie est différente des méthodologies usuellement utilisées dans les études portant sur la voiture autonome. En effet, les démarches courantes tendent à réaliser plusieurs expérimentations pour évaluer à chaque fois un aspect particulier comme celle de LYONS ET AL. (2017) qui s'est focalisée sur l'impact de la transparence sur la confiance. Nous avons procédé de manière différente : nous avons réalisé une expérimentation de grande ampleur prenant en compte plusieurs aspects. Cette façon de procéder présente des avantages et des inconvénients. En ce qui concerne les avantages, on peut évoquer la disponibilité du matériel et des ressources humaines pendant un temps défini sans avoir à les solliciter de façon répétée. Cependant, il y a un inconvénient qui est le fait de ne pas pouvoir explorer de façon exhaustive tout ce qui est relatif à un aspect donné.

Au niveau du **plan d'expérience**, nous avons opté pour des groupes de mesures semi-appariés. L'approche classique utilisant des groupes de mesures appariés aurait consisté à présenter à chaque participant les 5 modalités que nous avons retenues, alors que l'approche choisie consiste à ne soumettre à chaque sujet que 3 modalités. Ce choix a été fait pour respecter la limite de durée d'un test sur simulateur, i.e. environ 40 min. La contrainte était qu'à la fin du test, il y ait autant de sujets qui aient été confrontés aux modalités 1, 2, 3, 4 et 5. Compte tenu du budget restreint, nous n'avons pu recruter que 45 participants et n'avons pas pu respecter stricto sensu cette contrainte : toutes les IHM n'ont pas été consultées un même nombre de fois. Cependant, en termes de déroulement pratique, nous avons évité quelques biais par des aménagements spécifiques (SOCKEEL & ANCEAUX, 2008) :

- la fatigue : Pour pallier cet effet, des pauses ont été aménagées entre les différentes passations ;
- L'effet d'ordre : pour pallier cet effet, trois scenarios différents et comportant des scènes similaires ont été conçus.

Au niveau de **l'environnement de l'expérimentation**, il s'agissait d'un simulateur statique, ce qui pourrait poser la question de la validité écologique qui est soulevée depuis près de 30 ans dans plusieurs articles (DENIAUD, HONNET, JEANNE, & MESTRE, 2014, 2015). Ces articles suggèrent que le comportement d'un participant dans un environnement virtuel n'est pas équivalent à ce qu'il serait en situation réelle, à cause du manque de réalisme du simulateur tant au niveau physique que comportemental mais aussi à cause de l'absence de danger réel (ALLEN, MITCHELL, STEIN & HOGUE, 1991). La question du réalisme physique de DrSIHMI peut être posée parce qu'il n'a pas le même aspect qu'une voiture (Figure 48) et qu'il est statique, ce qui implique un ressenti nul ou faible de la dynamique latérale ou longitudinale du véhicule. Par ailleurs, les scénarios que nous avons développés ne sont pas aussi diversifiés que ceux que l'on pourrait rencontrer dans la vie réelle. Cependant, nous pouvons espérer qu'il y ait une consistance entre les résultats obtenus sur ce simulateur et ceux obtenus dans un simulateur dynamique. Cette idée est confortée par les travaux de ENGSTRÖM, JOHANSSON ET ÖSTLUND (2005) qui ont réalisé des tests similaires dans deux simulateurs statique et dynamique et ont montré la consistance des résultats des deux tests, lesquels étaient également consistants avec ceux obtenus en condition réelle.

Nous passons à présent au dernier chapitre de ce mémoire pour présenter les résultats.

Chapitre VII. **Validation expérimentale : résultats et discussion**

I. Introduction

Ce dernier chapitre présente les principaux résultats obtenus après les expérimentations menées, l'objectif principal pour nous étant de valider les principes de transparence. Certaines analyses étant très lourdes (notamment celles liées à l'analyse des mouvements oculaires), nous avons décidé - à l'issue des premières analyses réalisées - de nous focaliser sur trois scènes en particulier parmi les 11 possibles qui constituent un scénario :

- *t* : Cette scène, codée par [11] dans le Tableau 5 du chapitre précédent, a été retenue à cause du profond sentiment d'inconfort qu'elle a engendré chez l'ensemble des participants. Il s'agit de la scène de changement de voie avec deux poids lourds (Figure 54). Dans cette scène, la voiture autonome arrive à 120km/h derrière le poids lourd 1 (PL 1) qui roule à 75 km/h sur la voie de droite, et décide de faire un changement vers la voie centrale. De façon subite, le poids lourd 1 décide aussi de faire un changement de voie pour dépasser un autre poids lourd 2 (PL 2) qui roule à 60 km/h. La voiture autonome (VA) reste derrière PL1. Elle ne peut en effet se déporter sur la voie de gauche, parce qu'il y a un véhicule de police et un autre véhicule qui arrivent par l'arrière à vitesse rapide. Ensuite, le PL1 fait un changement de voie vers la droite pour se placer devant le PL2. À cause du véhicule de police, la VA fait également un changement de voie vers la droite et s'intercale entre le poids lourd 1 et le poids lourd 2. Une fois le véhicule de police passé, le VA fait un changement de voie pour dépasser PL 1 avant de retourner vers la voie droite. Cette scène dure environ 8 s.

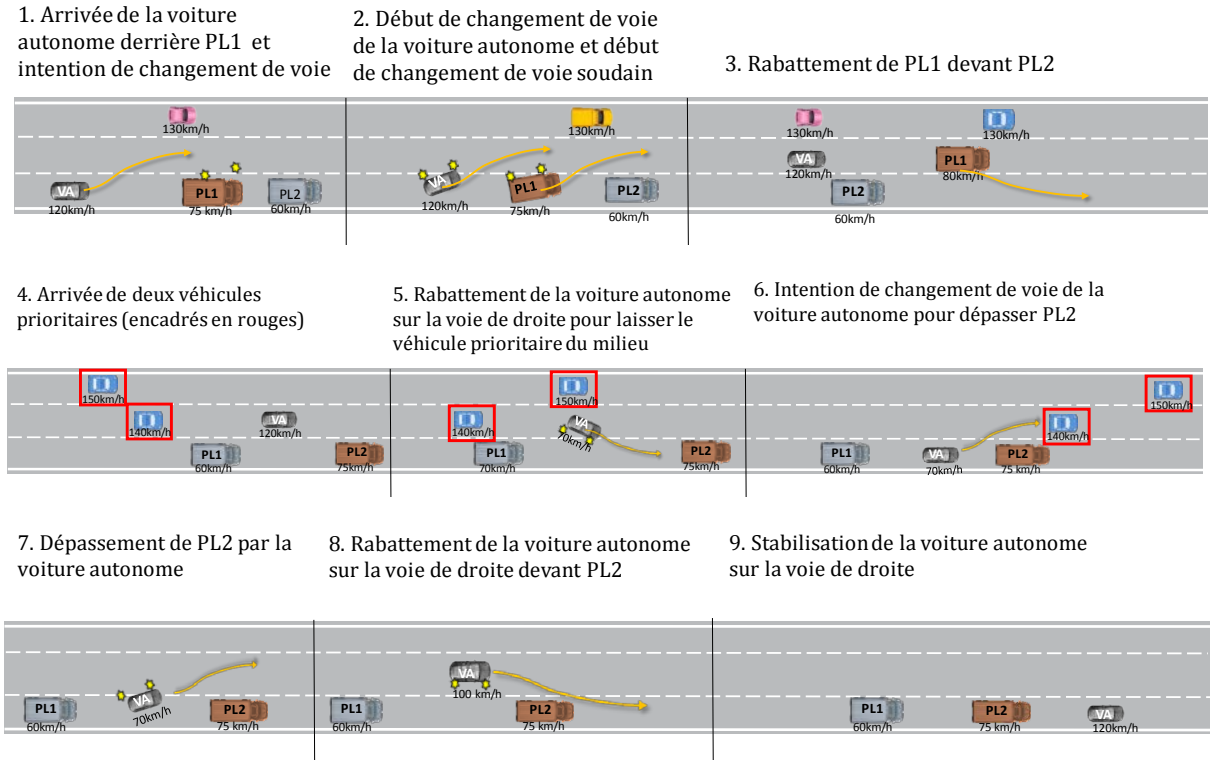


Figure 54: Scène de dépassement avec les deux poids-lourds

- *s* : Cette scène (Figure 55), codée par [21] dans le Tableau 5, a quant à elle été sélectionnée à cause de la surprise qu'elle a suscitée chez plusieurs participants. Au cours de cette scène, le véhicule autonome réalise un double changement de voie vers la gauche pour respecter son itinéraire, peu avant une séparation de l'autoroute en deux.

Pendant près de 5 s, avec une vitesse constante de 120 km/h, la voiture autonome effectue ce changement, i.e., elle « traverse » deux voies dans un environnement où il n'y a aucune voiture aux alentours.

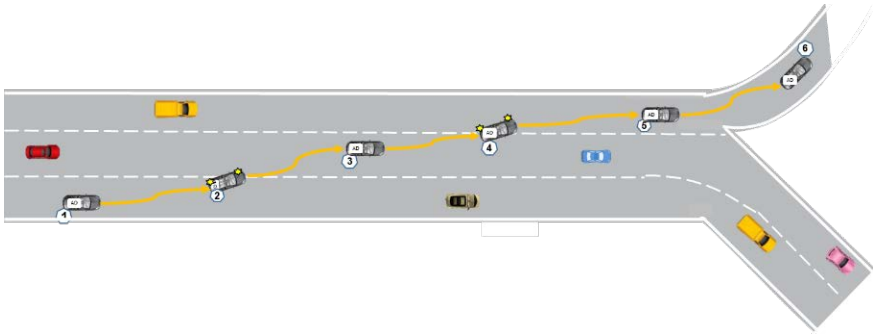


Figure 55 : Scène de changement de voie à cause de la séparation d'autoroute

- *d* : Identifiée en tant que [9], cette scène (Figure 56) est une scène de dépassement dans laquelle la voiture autonome est obligée de freiner à cause du déboîtement soudain d'un véhicule issu d'un « train de véhicules ». Cette scène a été sélectionnée à cause du caractère soudain du comportement de ce véhicule qui a poussé la voiture autonome à modifier son contrôle longitudinal, et par conséquent de l'effet de surprise occasionné chez les participants.

Figure 56 : Scène de dépassement avec déboîtement soudain d'un véhicule issu d'un train de véhicules

- *c* : Identifiée en tant que [7] dans le Tableau 5, cette scène (Figure 57) correspond à un virage serré vers la droite sur l'autoroute. Dans cette scène, la voiture autonome passe rapidement d'une vitesse de 120 km/h à l'entrée du virage à une vitesse de 90 km/h, pour respecter la signalisation. Cette scène dure environ 2,5 s.

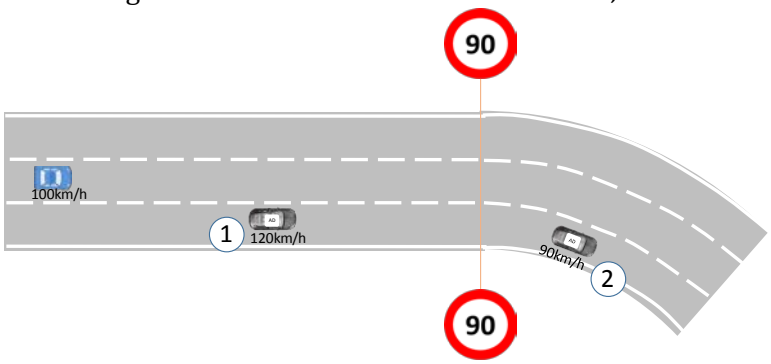


Figure 57 : Scène de virage

Dans ce chapitre, les lettres *t, s, d* et *c*, seront utilisées pour désigner ces scènes.

Ce chapitre est constitué de deux sections principales suivie par une discussion des résultats. Dans la première section, nous présenterons les résultats issus de l'analyse des variables considérées comme étant des indicateurs des activités cognitives de l'agent humain,

tandis que la deuxième sera consacrée à la présentation de ceux issus de l'analyse des variables renseignant sur l'expérience utilisateur.

II. Analyse des variables liées aux activités cognitives

Les activités cognitives sont évaluées au travers des données d'oculométrie, de l'analyse du contenu IHM perçu et de l'évaluation de la *Situation Awareness*.

II.1 Les données oculométriques

Pour l'analyse de données d'oculométrie, nous nous sommes focalisés sur les scènes *s* et *t* et sur les roulages 2 et 3 de chaque participant. Les données oculométriques du premier roulage, quant à elles, n'étaient pas facilement exploitables car tous les roulages 1 ont été interrompus pour mesurer la *Situation Awareness* de chaque participant.

Pour cette analyse, nous nous sommes intéressés à la scène de changement de voie avec les deux poids lourds et à celle définie par la séparation d'autoroute. Pour chacune de ces deux scènes, nous avons subdivisé les affichages en dix zones d'intérêt décrites dans le Tableau 37 et représentées dans la Figure 58. Une 11ème zone a été définie pour classer les fixations ayant eu lieu en dehors des dix zones d'intérêts.

Tableau 37 : Codage des zones d'intérêt

Zone d'intérêt	Abréviation	Signification
HUD avec Réalité Augmentée	AR HUD	Augmented reality Head Up Display
HUD sans Réalité Augmentée	NAR HUD	Augmented reality Head Up Display
Route droite	RR	Right Road
Route gauche	LR	Left Road
Route haute	HR	High Road
Rétroviseur gauche	LM	Left Miror
Rétroviseur droit	RM	Right Miror
Rétroviseur central	CM	Central Miror
Boîte à boutons	BB	Button Box
Navigation	NAV	Navigation
Autre	W	White

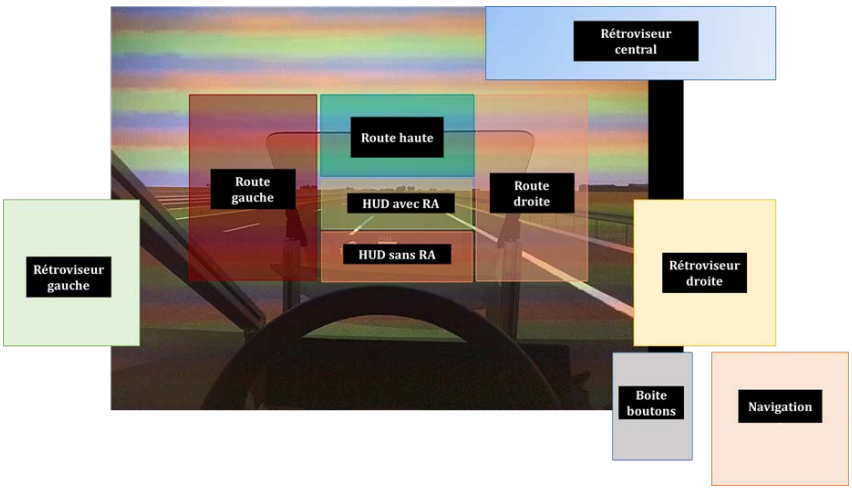


Figure 58 : Représentation des zones d'intérêt

Afin d'évaluer l'impact de quelques facteurs dont l'interface sur le nombre de fixations dans chaque zone d'intérêt et pour les deux scènes retenues (*s* et *t*), nous avons fait une analyse en

composantes multiples (ACM). La première étape a consisté à réaliser un codage flou pour catégoriser le nombre de fixations. Pour ce faire, 3 modalités ont été définies (Figure 59) :

- *n* pour indiquer qu'il y avait 0 fixation ;
- *l* pour indiquer un nombre « petit » de fixations c'est-à-dire compris entre 1 et 5 ;
- *h* pour indiquer un nombre « grand » de fixations, c'est-à-dire supérieur à 5.

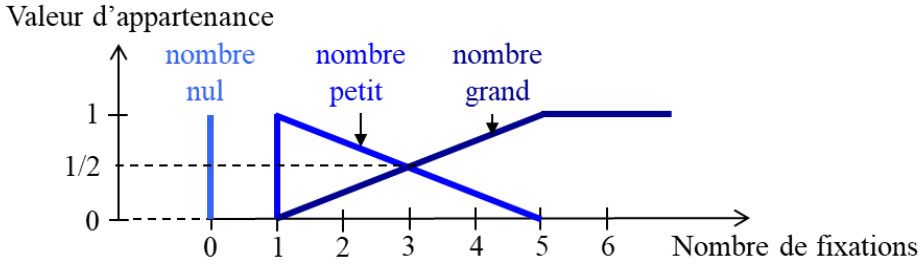


Figure 59 : Définition des fonctions d'appartenance des trois modalités relatives au nombre de fixations dans une fenêtre spatiale donnée.

Un tel codage permet de limiter la perte d'informations lorsqu'on fait un moyennage sur les données. Afin de mieux comprendre l'intérêt d'un codage flou nous proposons de considérer, à titre d'exemple, le nombre de fixations des trois couples d'individus suivants dans la même[44] zone d'intérêt « HUD sans Réalité Augmentée », codée par NAR :

- Deux individus A et B ayant respectivement effectué 10 et 0 fixations dans NAR.
- Deux individus C et D ayant respectivement effectué 5 et 5 fixations dans la même zone.
- Deux individus E et F ayant respectivement réalisé 4 et 6 fixations dans la même zone.

En calculant la moyenne arithmétique du nombre de fixations pour chacun de ces trois couples d'individus, on obtient une moyenne arithmétique identique de 5. Cependant, si le nombre de fixations est codé suivant les 3 modalités, *n*, *l* et *h* définies précédemment on obtient des moyennes de valeurs d'appartenance différentes, mettant bien en évidence les différences de fixations entre les participants, Tableau 38.

Tableau 38 : Intérêt du codage flou avant le calcul des moyennes

Couple d'individus	Participants	Nombre de fixations dans NAR	Codage flou et valeurs d'appartenance			Moyennes des valeurs d'appartenance		
			NAR*n*	NAR*l*	NAR*h*	NAR*n*	NAR*l*	NAR*h*
1	A	0	1	0	0	0.5	0	0.5
	B	10	0	0	1			
2	C	5	0	1	0	0	1	0
	D	5	0	1	0			
3	E	4	0.2	0.8	0	0.1	0.8	0.1
	F	6	0	0.8	0.2			

.

L'intérêt du codage ayant été montré, nous présentons à titre d'exemple – dans le Tableau 39 - les valeurs d'appartenance du nombre de fixations, pour un participant, CA, dans le roulage 3 et pour la scène de dépassement avec les deux poids-lourds. Cet exemple est donné afin de mieux se rendre compte du codage flou. Nous avons volontairement omis de présenter les résultats pour la zone d'intérêt HUD avec Réalité augmentée. Nous reviendrons sur ce choix dans les lignes suivantes.

[44] Oscillant majoritairement entre 0 et 10

Tableau 39 : Valeurs d'appartenance pour le participant CA dans le 3ème roulage, dans la scène de dépassement avec les deux poids-lourds

Zones d'intérêt	NAR			RM			LM			W		
Nombre de fixations	7			0			8			1		
Valeurs d'appartenance	NAR*n* 0	NAR*l* 0,8	NAR*h* 0,2	RM*n* 1	RM*l* 0	RM*h* 0	LM*n* 0	LM*l* 0,2	LM*h* 0,8	W*n* *0*	W*l* 1	W*h* 0

Zones d'intérêt	CM			LR			NAV		
Nombre de fixations	1O			0			ND		
Valeurs d'appartenance	CM*n* 0	CM*l* 0	CM*h* 1	LR*n* 1	LR*l* 0	LR*h* 0	NAV*n* -	NAV*l* -	NAV*h* -

Zones d'intérêt	RR			HR			BB		
Nombre de fixations	0			ND			0		
Valeurs d'appartenance	RR*n* 1	RR*l* 0	RR*h* 0	HR*n* -	HR*l* -	HR*h* -	BB*n* 1	BB*l* 0	BB*h* 0

Il est indéniable que l'étude d'un tableau de valeurs d'appartenance est plus compliquée que l'analyse des valeurs initiales. Précisons que l'application de moyennage illustrée dans le Tableau 38 sera effectuée pour montrer les effets des facteurs, les lignes correspondant aux profils moyens (une ligne par modalité de facteur) étant considérées « en supplémentaires » (BENZECRI, 1980). Toutes les analyses statistiques ont été faites avec l'outil R (package FactoMineR pour l'ACM). Nous présentons les principaux résultats dans les lignes suivantes.

a) Résultats

Avant de réaliser l'ACM, une phase de codage a permis d'obtenir un tableau Y0 comportant :

- 80 lignes. Ce nombre correspond aux 80 roulages analysés étant donné que seules les fixations de 40 participants dans les roulages 2 et 3 ont été pris en compte. Ce qui représente bien les 40*2 lignes. En effet, à cause du caractère aberrant de leurs données, les fixations de 5 participants ont été écartées.
- 33 colonnes. Ce nombre correspond à l'ensemble des modalités associées aux 11 zones d'intérêt qui ont chacune 3 modalités (*n, l* et *h*) soit 33 (11*3) colonnes.

Nous avons ajouté 11 points supplémentaires (correspondant à 11 colonnes) pour évaluer l'effet des facteurs « Interface », « Scène », « Roulage » et « Sexe », soit :

- 5 points pour les 5 interfaces *In, Iw, Ii, Is* et *It ;*
- 2 points pour les 2 scènes *s* et *t* ;
- 2 points pour les roulages 2 et 3 DN2 et DN3 ;
- 2 points pour le facteur sexe : F (femme) et M (homme).

Nous parlons de points parce que les données provenant des colonnes ajoutées ont été moyennées suivant les valeurs d'appartenance pour être représentées dans les différents graphiques que nous avons faits. Les deux axes principaux contribuent à 16% et 10% de la variance totale, contrairement aux autres qui avaient des contributions plus faibles. L'axe 1, l'axe

horizontal oppose les modalités extrêmes *n* et *h* tandis que l'axe vertical oppose la modalité intermédiaire, *l,* aux deux autres. Dans l'ACM, l'intersection entre les axes principaux correspond au centre de gravité. Par conséquent, la position éloignée d'un point signifie que la masse de ce point est faible. Les positions relatives des points-colonnes montrent non seulement les relations entre les variables mais également les fréquences respectives des modalités. Si la fréquence est très faible (imaginons qu'un seul participant a utilisé une modalité « élevée » de la variable V), le point *Vh* va avoir une position aberrante, ce qui peut correspondre soit à un comportement effectif, soit à une donnée erronée (c'est-à-dire qui provient d'une erreur d'entrée de la donnée ou un dysfonctionnement matériel). L'ACM du tableau Y0 a mis en exergue une dizaine de points très excentrés. Un retour au tableau initial a permis de montrer que le nombre de fixations était nul pour les 11 zones. Nous pensons donc que ces données sont incorrectes, soit parce qu'il y a eu une erreur de manipulation des données, soit parce qu'il y a eu un problème avec l'oculomètre. Plusieurs bouclages impliquant 1) l'ACM, 2) l'étude des données « douteuses » et 3) la correction (quand cela a été possible) ou la suppression (dans les autres cas, c'est-à-dire suppression des points lignes) ont été effectués. Une conséquence de ces bouclages a été la suppression de la modalité *ARn* car plus aucune des situations restantes (points-lignes) ne comportait 0 fixation sur la zone AR (HUD avec Réalité Augmentée). Nous reviendrons, dans la discussion, sur ces itérations.

Les représentations graphiques de la Figure 59 permettent d'évaluer l'importance du nombre de fixations par zone d'intérêt, par scène, par genre et par IHM d'une part dans la Figure 60.b, et par participant d'autre part. Nous explicitons ces représentations plus en détail dans les lignes suivantes.

L'axe 1 est principalement défini par les modalités suivantes qui peuvent être observées sur la Figure 60.a à droite :

1. HR*h* (nombre élevé de fixations dans la zone d'intérêt « Route haute ») ;
2. RM*l* (nombre faible de fixations dans la zone d'intérêt « Rétroviseur droit ») ;
3. BB*h* (nombre élevé de fixations dans la zone d'intérêt « boite à boutons ») ;
4. LR*h* (nombre élevé de fixations dans la zone d'intérêt « Route gauche ») ;
5. CM*h* (nombre élevé de fixations dans la zone d'intérêt « Rétroviseur central ») ;
6. LM*h* (nombre élevé de fixations dans la zone d'intérêt « Rétroviseur gauche ») ;

L'axe 2, quant à lui, est principalement défini par les modalités suivantes, observables sur la Figure 60.a à gauche :

1. NAR*n* (nombre nul de fixations dans la zone d'intérêt « HUD non Réalité Augmentée ») ;
2. AR*l* (nombre faible de fixations dans la zone d'intérêt « HUD avec Réalité Augmentée ») ;
3. W*n (*nombre nul de fixations dans la zone d'intérêt « White ») ;
4. LM*n* (nombre nul de fixations dans la zone d'intérêt « Rétroviseur gauche ») ;
5. LR*n* (nombre nul de fixations dans la zone d'intérêt « Route gauche ») ;

La Figure 60.b représente le nombre de fixations réalisées par un individu (identifié par deux lettres) dans un roulage (2 ou 3) dans une scène donnée (t ou s). Ainsi le point Jb3t (en haut à gauche sur la Figure 60.b) correspond au nombre de fixations du participant Jb dans le roulage 3 et dans la scène de dépassement avec les deux poids lourds. Une analyse similaire montre que, sur la Figure 60.b, les points correspondant à la scène de dépassement des deux poids-lourds ont une plus forte contribution dans le nombre de fixations, contrairement aux points correspondant à la scène de changement de voie à cause de la séparation d'autoroute.

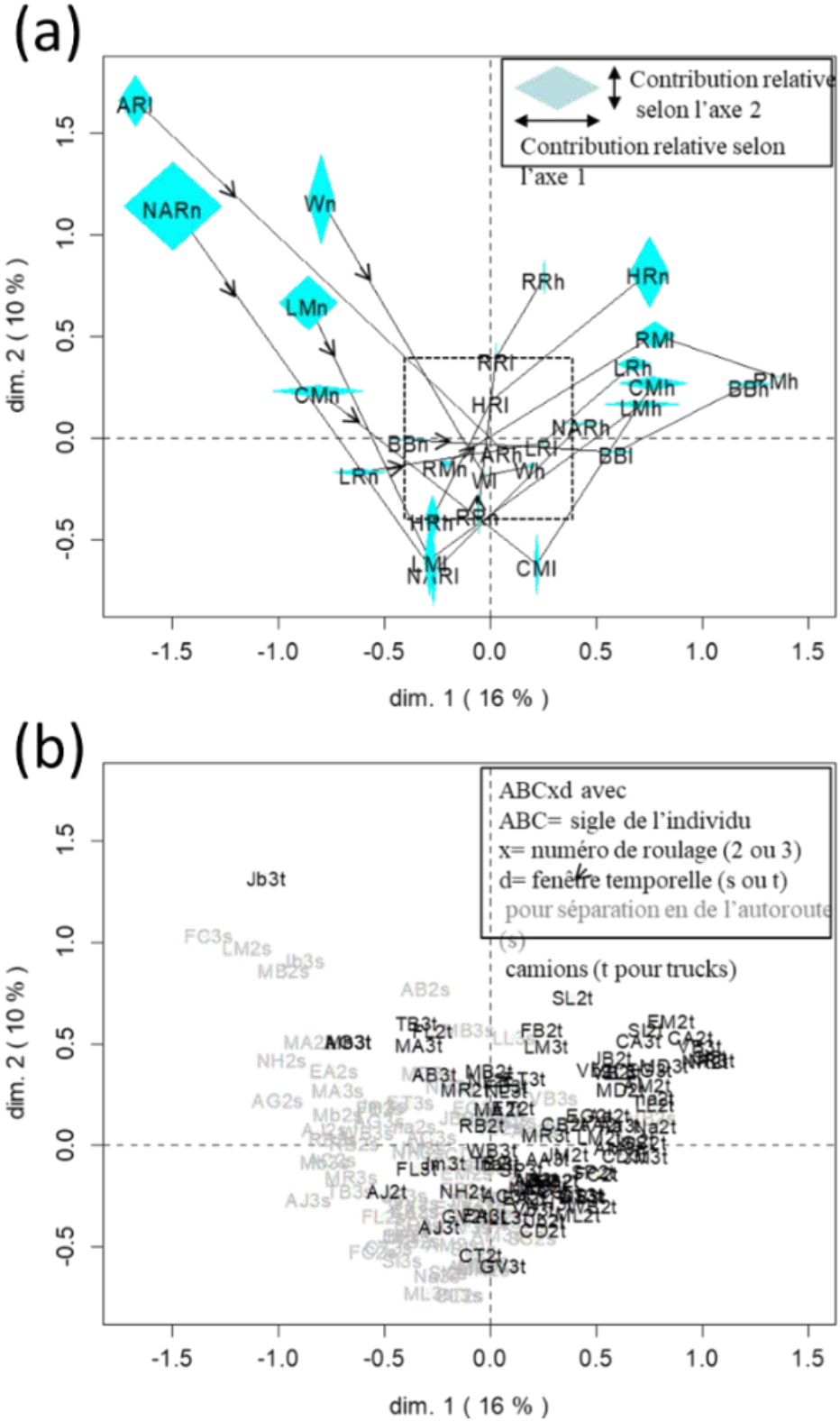


Figure 60 : Plan principal de l'ACM du tableauY0, contenant les valeurs d'appartenance aux 3 modalités de nombre de fixations.
a) Projection des points colonnes correspondant aux zones d'intérêt, aux scènes, au genre et aux interfaces.
b) Projection des points lignes correspondant aux participants

Afin de mieux nous rendre compte de quelques effets, nous avons réalisé par changement de facteur d'échelle, un zoom sur le cadre en pointillés de la Figure 60.a. La Figure 61, résultat de ce zoom, met en évidence que l'effet du facteur « Scène » est relativement faible, mais toutefois plus grand que les effets des facteurs « Interface », « roulage » et « sexe » (Figure 61.b).

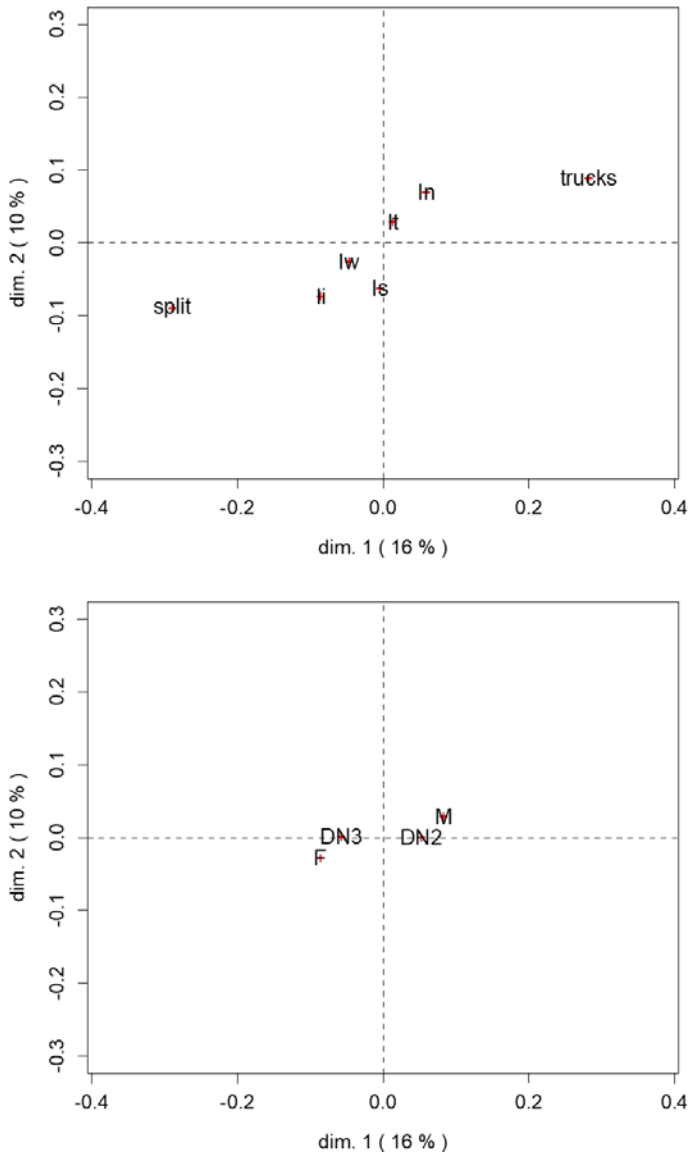


Figure 61 : Plan principal de l'ACM du tableau contenant les valeurs d'appartenance aux 3 modalités de nombre de fixations.
a) projection en supplémentaire des points correspondants aux 5 modalités de l'interface et aux 2 fenêtres temporelles.
b) idem pour le facteur sexe (point F et M) et le facteur roulage (DN2 et DN3).

En vue d'apprécier les différences entre les deux scènes mises en exergue par l'ACM, on peut représenter les proportions des nombres de fixations par zone d'intérêt après leur codage flou suivant les trois modalités *n, l* et *h*. La Figure 62 et la Figure 63 représentent ces proportions respectivement pour la scène de changement de voie à cause de la séparation d'autoroute et la scène de dépassement avec les deux poids-lourds. Chacune de ces deux figures se lit de la façon suivante :

- Chaque barre verticale montre des statistiques sur un effectif total de 90 situations (45 individus testant chacun deux passages d'un scénario, celui avec la séparation d'autoroute *s* ; celui avec le dépassement d'un camion, *t*) ;
- À l'intérieur de chaque barre, on indique le nombre de fois où, parmi les 90 situations individuelles, le nombre de fixations est nul (en blanc), entre 1 et 5 (en gris) et supérieur à 5 (en noir) ;
- Le passage d'une barre à l'autre le long d'un axe horizontal correspond à un changement de zone d'intérêt.

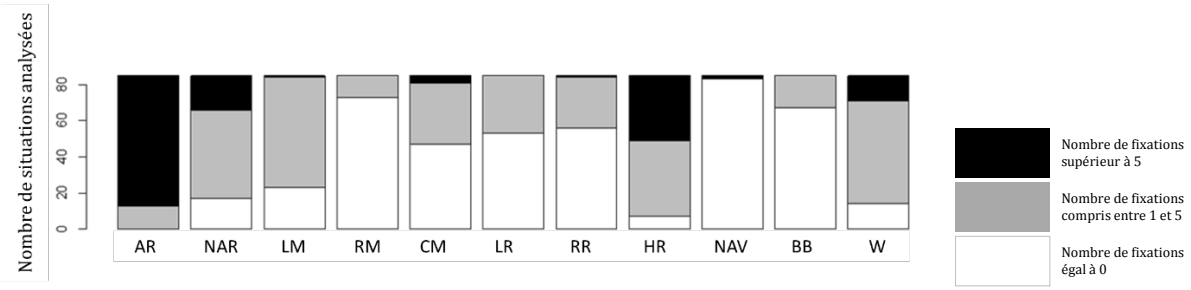


Figure 62 . Répartition du nombre de fixations dans les 90 situations dans la scène avec la séparation d'autoroute

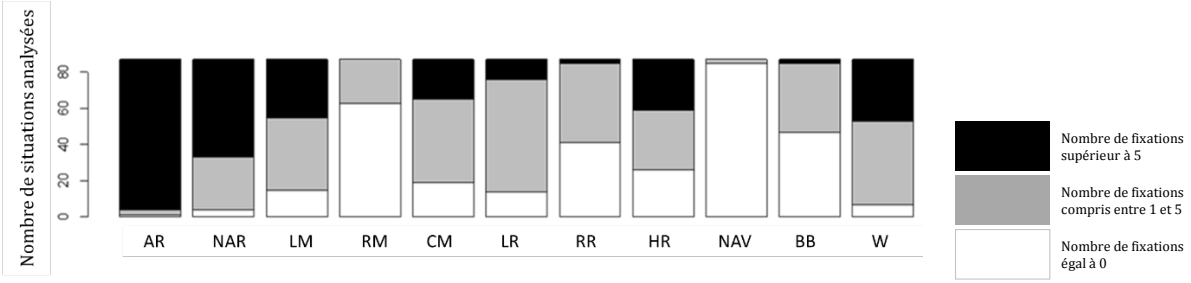


Figure 63. Répartition du nombre de fixations dans les 90 situations dans la scène de dépassement de 2 poids lourds.

On peut essayer d'affiner l'analyse statistique en faisant appel à une approche inférentielle. Par exemple, on peut chercher à étudier l'effet du facteur « Interface » sur le nombre de fixations en se focalisant sur des comparaisons des interfaces deux à deux parmi *In, Iw, Ii, Is* et *It,* soit 10 comparaisons en tout. Il faut toutefois garder à l'esprit que la taille de l'échantillon est petite avec des indicateurs dont les distributions sont éloignées de celle de Laplace-Gauss (ce qui rend préférable l'utilisation de tests non-paramétriques). Si on prend le seuil de 5%, quasiment aucun test d'hypothèses n'a donné de différences significatives. Les seuls tests significatifs sont obtenus pour :

1. Le HUD sans Réalité Augmentée, dans la séparation d'autoroute avec *In* < *It ; In* étant l'interface de référence et *It*, celle comprenant les informations issues des quatre fonctions de PARASURAMAN, SHERIDAN ET WICKENS (2000).
2. Le HUD sans Réalité Augmentée, dans le dépassement de deux camions avec *In* < *Iw ; Iw* étant l'interface comprenant les informations issues des deux fonctions « Prise d'information » et « Implémentation de l'action ».

Ces résultats sont discutés dans le paragraphe suivant.

b) Discussion

Les seuls résultats significatifs montrent qu'il y a eu un nombre de fixations dans l'afficheur tête haute sans réalité augmentée plus élevé dans *It* – comprenant les informations de toutes les fonctions - que dans *In* – qui ne comprenait que des informations de référence, dans la scène de séparation d'autoroute. Dans le même sens, le nombre de fixations est plus élevé dans *Iw* - qui contenait les informations issues des fonctions « Prise d'information » et « Implémentation de

l'action » - que dans *In* dans l'afficheur tête haute sans Réalité Augmentée. Qu'il s'agisse de *Iw* ou de *It* (et à la différence de *In*), dans la zone d'intérêt du HUD sans réalité augmentée, était affiché le tableau à 9 cases qui couple la dynamique longitudinale et la dynamique latérale de la voiture autonome, pour valider le principe T1 selon lequel ***« Dans le mode autonome établi, le conducteur doit être informé que l'automate contrôle la voiture en respectant les règles et pratiques de la conduite en vigueur (prédictibilité du comportement de la voiture). Par ailleurs, le conducteur doit être capable de détecter les actions (changement ou maintien de trajectoire, changements de vitesse) en cours de réalisation par la voiture et les comprendre. »***

Les participants ayant été tenu informés du fait que l'expérimentation se faisait uniquement en mode autonome établi au cours des trois roulages, ils regardaient très peu les deux dernières informations. Dès lors, les deux principales informations qui ont attiré l'attention des participants étaient la vitesse et le tableau à 9 cases. Il en ressort donc que les agents humains étaient particulièrement intéressés par la dynamique du véhicule autonome, i.e. les modifications réalisées par l'automate sur le contrôle latéral et sur les modifications de vitesse pour le contrôle longitudinal. En ce qui concerne l'intérêt pour le tableau à 9 cases, le sentiment d'inconfort provoqué par la scène de dépassement des deux poids-lourds et le sentiment de surprise provoqué par la scène avec la séparation d'autoroute peuvent expliquer ce résultat. En effet, les participants ont voulu comprendre ce que faisait le véhicule autonome. Par conséquent, il y a des éléments positifs en faveur de la validation du principe T1.

Un autre résultat, bien que non significatif, est relatif au nombre très peu élevé de fixations sur le rétroviseur gauche dans la scène avec la séparation d'autoroute, alors que dans la scène de changement de voie avec les deux poids lourds, ce nombre est plus important. Une hypothèse est que, étant donné qu'il y avait plus de trafic dans la scène avec les deux poids lourds que dans celle avec la séparation d'autoroute, les participants étaient plus en recherche d'informations pour comprendre la situation et vérifier si l'automate réagissait convenablement. Il semble important de rappeler que l'annotation de Blind Spot était présente dans cette scène pour indiquer la présence d'un véhicule dans l'angle mort de la voiture autonome. La scène avec la séparation d'autoroute, quant à elle, a sans doute suscité des contrôles très rapides à cause de l'absence d'autres véhicules dans l'environnement de conduite. Une autre hypothèse est que l'attention des participants n'a pas été attirée parce qu'il n'y avait pas d'annotations en Réalité Augmentée.

Nous avons également relevé que le nombre de fixations était légèrement plus important dans la scène de dépassement avec les deux poids-lourds que dans celle caractérisée par la séparation d'autoroute. Une première hypothèse est que le nombre de véhicules plus élevé dans la scène de dépassement a attiré plus l'attention des agents humains que la scène avec la séparation d'autoroute où il n'y avait aucun véhicule. Par ailleurs, le nombre de fixations plus élevé dans la scène de dépassement que dans celle avec la séparation d'autoroute, peut s'expliquer par le fait qu'il y avait plus d'annotations en Réalité Augmentée dans le HUD avec Réalité Augmentée dans la première scène de dépassement avec les camions, contrairement à la deuxième. En effet, dans la scène de dépassement avec les deux poids-lourds, il y avait les annotations de différentiel de vitesse des poids lourds, la différence entre les véhicules-cibles et les autres, les annotations de différentiel de distance. Dans la scène avec la séparation d'autoroute, il y avait au maximum la raison du changement de voie et l'action de changement de voie.

L'analyse des données oculométriques étant réalisée, pour continuer à examiner les activités cognitives réalisées par les agents humains en fonction des interfaces, nous avons examiné les informations présentes sur les interfaces évoquées par les participants lors des entretiens. Nous présentons les résultats de cette deuxième analyse dans le paragraphe suivant.

II.2 Contenu des IHM

Le contenu des interfaces a été analysé à partir des entretiens d'explicitations et d'une partie du questionnaire Q2 auquel les participants devaient répondre à la fin de chaque roulage. Les résultats issus de l'analyse des entretiens d'explicitation sont d'abord présentés.

a) Entretiens d'explicitation

Les résultats de l'analyse des données verbales ont montré que pour décrire les scénarios de conduite, les participants ont eu recours à des données de l'environnement, du véhicule autonome, mais également à leurs connaissances.

- Parmi **les données de l'environnement**, les participants ont mentionné les données relatives aux autres véhicules, notamment leur comportement (trajectoire longitudinale et latérale).
- Parmi **les données liées au véhicule,** les participants ont mentionné les données relatives à son comportement notamment les éléments qui dépendent de la dynamique longitudinale et de la dynamique latérale. Parmi ces données, il y a également les informations indiquées par l'IHM ou leur absence.
- En ce qui concerne **leurs connaissances**, les participants ont évoqué :
    - Les règles formelles de conduite comme « Dans un virage, un véhicule respecte la limitation de vitesse ».
    - Les règles informelles acquises par l'expérience.
    - Les implicites liés à un type de véhicule (poids lourds).

Pour certaines de ces données, les participants ont donné des jugements de valeur en utilisant des adjectifs qualificatifs tels que « brusque », « tardif », etc. L'ensemble de ces éléments sont reportés dans le *Tableau 40*.

Tableau 40 : Ensemble des indices évoqués par les participants

Indices	État/Nature	Évolution	Exemples de verbatims
Position **(d'un autre véhicule)**	Dans l'angle mort		« J'ai vu qu'il y avait un véhicule dans l'angle mort. » Is
	Légèrement à l'arrière		« Il était légèrement à l'arrière. » Ii
Trajectoire **(référence à un véhicule en particulier)**	Déboîtement	Tardif, au dernier moment	
	Déport		
Indicateur **(référence à un véhicule en particulier)**	Clignotant		« Le camion avait mis son clignotant. » In
Disponibilité de la voie	Libre, dégagée		« […] La voie de gauche est libre. » Ii
Vitesse	Différentiel de vitesse		
Actions **(réalisées ou non)**	Doubler		
	Dépasser		
	Freiner, décélérer	Brusque, rapide Tardivement	« Le véhicule freine brusquement. » In « Le camion m'a obligé à freiner rapidement. » Is
	Accélérer		
	Ne pas anticiper l'action d'un autre conducteur		« Pourquoi ne pas anticiper avant ? » In
	Se rabattre		« Je pouvais me rabattre derrière le poids lourd. » Is
	Annuler le changement de		« Il nous fait signe qu'il voulait

	voie		effectivement changer de voie et qu'il annule le changement de direction. » Ii
***Interdistance* entre le VA et le véhicule qui le précède**	Pas sécurisante		« La distance de sécurité n'était pas assez sécurisante. » Is
Infrastructure	Panneau de virage		« On voit le panneau depuis 1000 ans. » In
	Signalisation au sol		
***Règles formelles* (code de la route)**	Dans un virage, un véhicule respecte la limitation de vitesse.		
Règles informelles	Un véhicule léger ne reste pas longtemps derrière un poids lourd.		

Conscients du caractère général des résultats que nous venons de présenter sur le contenu IHM, nous allons maintenant les préciser en fonction des scènes de conduite en particulier le virage et la scène de dépassement avec les deux poids lourds.

i. Le virage

Nous avons porté une attention particulière à la scène de virage. Deux questions ressortent de l'analyse des verbatims : i) Est-ce que le VA a bien détecté le virage ? et ii) Quelle est la limitation de vitesse dans le virage ? Les réponses à ces questions ont permis de construire un graphe d'analyse de la situation dans les différentes IHM (Figure 64).

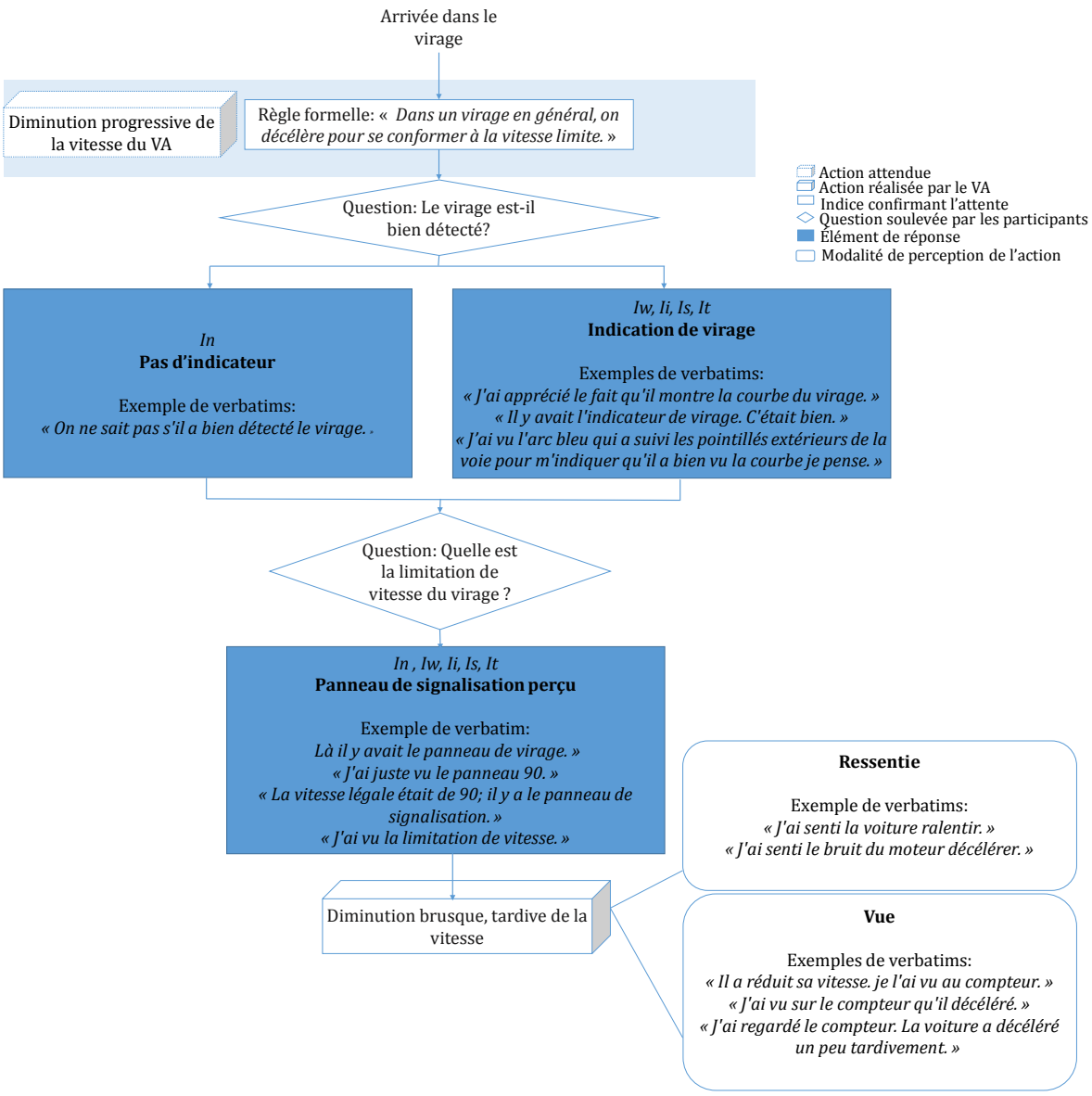


Figure 64 : Graphe d'analyse du virage avec In, Iw, Ii, Is et It

La Figure 65 présente une synthèse des résultats en ce qui concerne les jugements de l'annotation de virage en réalité augmentée dans les 5 IHM. L'annotation était une ligne curviligne qui s'adaptait à la courbure du virage. Comme nous l'avons mis en évidence dans la partie II, surligner le virage résulte d'une volonté d'éprouver le principe E1 selon lequel ***« Dans le mode autonome établi, le conducteur doit avoir une perception suffisante de ce que la voiture autonome perçoit pour effectuer ses analyses et prendre ses décisions. Il doit être assuré que la voiture autonome dispose des informations nécessaires à la prise de décision ».***

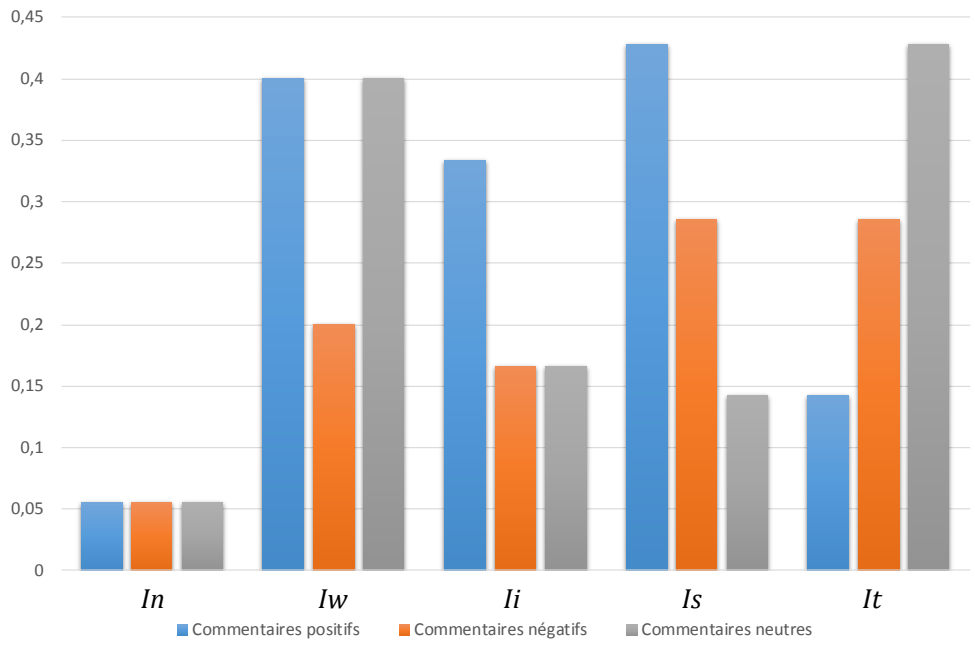


Figure 65 : Proportion de personnes par IHM ayant donné des commentaires positifs, négatifs ou neutres sur l'indication de virage qu'ils ont vue

On remarque qu'une faible proportion de participants ayant roulé avec *In,* l'interface de référence, émettent un jugement de valeur sur l'indication de virage alors que celle-ci n'y figurait pas. Il se trouve que ces participants avaient vu cette IHM avant, sur une autre interface qui contenait cette indication de virage. Nous faisons l'hypothèse que ce phénomène de confusion de modalité est dû à l'effort d'analyse des 3 interfaces consultées qui bien que similaires étaient distinctes. En ce qui concerne les autres interfaces, cette erreur n'a pas été constaté, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de participants qui ont mentionné que l'indication de virage était absente (sachant qu'elle était présente effectivement).

Par ailleurs, les commentaires relatifs à l'indication de virage sont globalement neutres ou positifs (près de 45%) : « *rassurant* », « *utile* », etc. Le participant 39 a explicitement relevé que le symbole « *indiquait qu'il (le VA) avait bien pris en compte le virage* ». Par ailleurs, il a mentionné que cette information manquait dans *In*, car « *on ne sait pas s'il a bien détecté le virage* ». Le fait qu'il y ait une forte proportion de personnes qui ont remarqué et apprécié l'indication de virage, montre l'intérêt du principe E1 en rapport avec la communication des objets perçus par la voiture autonome. Outre l'indication de virage, les participants ont mentionné qu'ils ont ressenti la dynamique du véhicule grâce au bruit moteur. Certains ont dit qu'après l'avoir ressenti, ils n'ont qu'après regardé la vitesse indiquée sur le HUD. Nous observons en particulier que dans *It* contrairement aux autres IHM, il y a plus de commentaires négatifs que de commentaires positifs. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il y a beaucoup plus d'éléments annotés dans cette IHM que dans les autres, ce qui a pu générer une surcharge informationnelle.

Dans le paragraphe suivant, nous analysons le contenu IHM perçu dans la scène de changement de voie avec les deux poids lourds.

ii. Scène de changement de voie avec les deux poids lourds

Pour analyser de façon précise cette scène, nous l'avons subdivisé en deux parties : la première au cours de laquelle le VA arrive derrière le PL 1 et fait le changement de voie (Figure

66), et la seconde au cours de laquelle le véhicule autonome est sur la voie du milieu avec PL 1 devant lui (Figure 67).

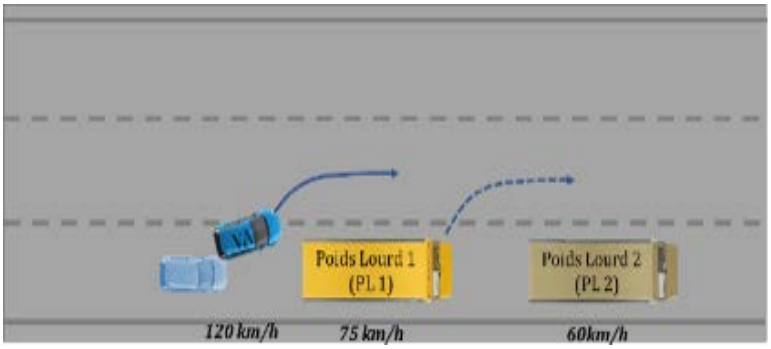


Figure 66 : Partie 1 du dépassement des deux poids lourds PL 1 et PL 2 par la voiture autonome (VA)

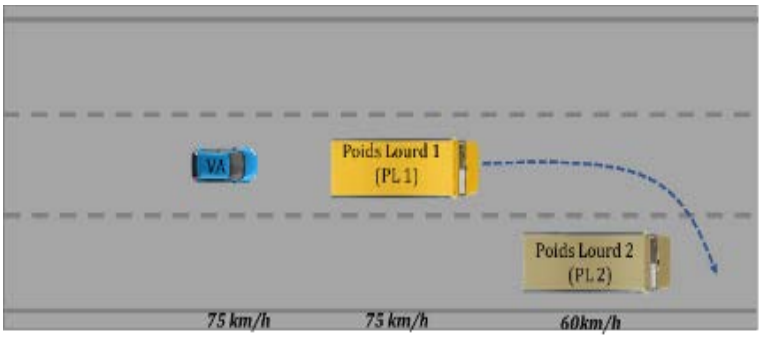


Figure 67 : Partie 2 du dépassement des deux poids lourds PL 1 et PL 2 par la voiture autonome (VA)

Une attention particulière a été accordée à la première partie qui a été identifiée comme une source d'anxiété par près de 80% des participants. Par ailleurs, nous avons volontairement écarté les évènements de rabattement du VA sur la voie de droite, car la plupart des participants ne s'en rappellent pas ou en ont un souvenir flou.

Les analyses des verbatims relatifs à cette partie nous ont permis d'établir des graphes pour chacune des interfaces. De façon générale, les participants ont relevé que l'interdistance entre le VA et PL1 était faible, voire très faible. Aussi pouvons-nous proposer comme explication que la faible distance entre les véhicules a généré du stress chez plusieurs participants, certains qualifiant même cette situation de dangereuse. En outre, deux questions reviennent quelle que soit l'IHM : Le VA a-t-il bien perçu PL1 ? Va-t-il effectuer un changement de voie ? Afin de comparer les différentes IHM, un graphe de synthèse a été réalisé, Figure 68. Dans *In*, qui ne contenait que les informations de référence, les participants ont relevé qu'il manquait des informations sur la détection de PL1 et sur l'action du VA. Ces deux questions pourraient expliquer en partie pourquoi les fixations des participants étaient significativement orientées vers le HUD aussi bien en RA qu'en non RA, afin de vérifier que les actions du VA étaient correctes. Dans *Iw* qui contient uniquement les informations issues des fonctions « prise d'information » et « implémentation de l'action », bien que certains participants aient perçu la cuvette bleue de détection de PL1, l'aspect « *dangereux* » de la situation ressort. Dans *Ii*, l'interface qui contient les informations issues des fonctions « prise d'informations », « analyse de l'information » et « implémentation de l'action », près de 10% des participants ont relevé le différentiel de distance avec le poids lourd. En outre, ils ont également évoqué l'action de changement de voie de l'égo-véhicule, ce qui répondait à la question de l'action en cours par la

voiture autonome qui se posait précédemment dans *In*. Nous pouvons relever que les évocations des participants en rapport avec la flèche d'intention de changement de voie ou de décision de changement de voie n'étaient pas aussi nombreuses que nous l'espérions, moins de 40% dans les 60 situations où elle apparaissait. Dans *Is* qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'informations », « analyse d'information » et « prise de décision » et *It* qui comprend les informations issues de toutes les 4 fonctions, les participants mentionnent le différentiel de vitesse de façon plus prononcée que dans *Ii*. Cet écart a été évalué sur la base du comptage réalisé. Aucun test statistique n'a été réalisé.

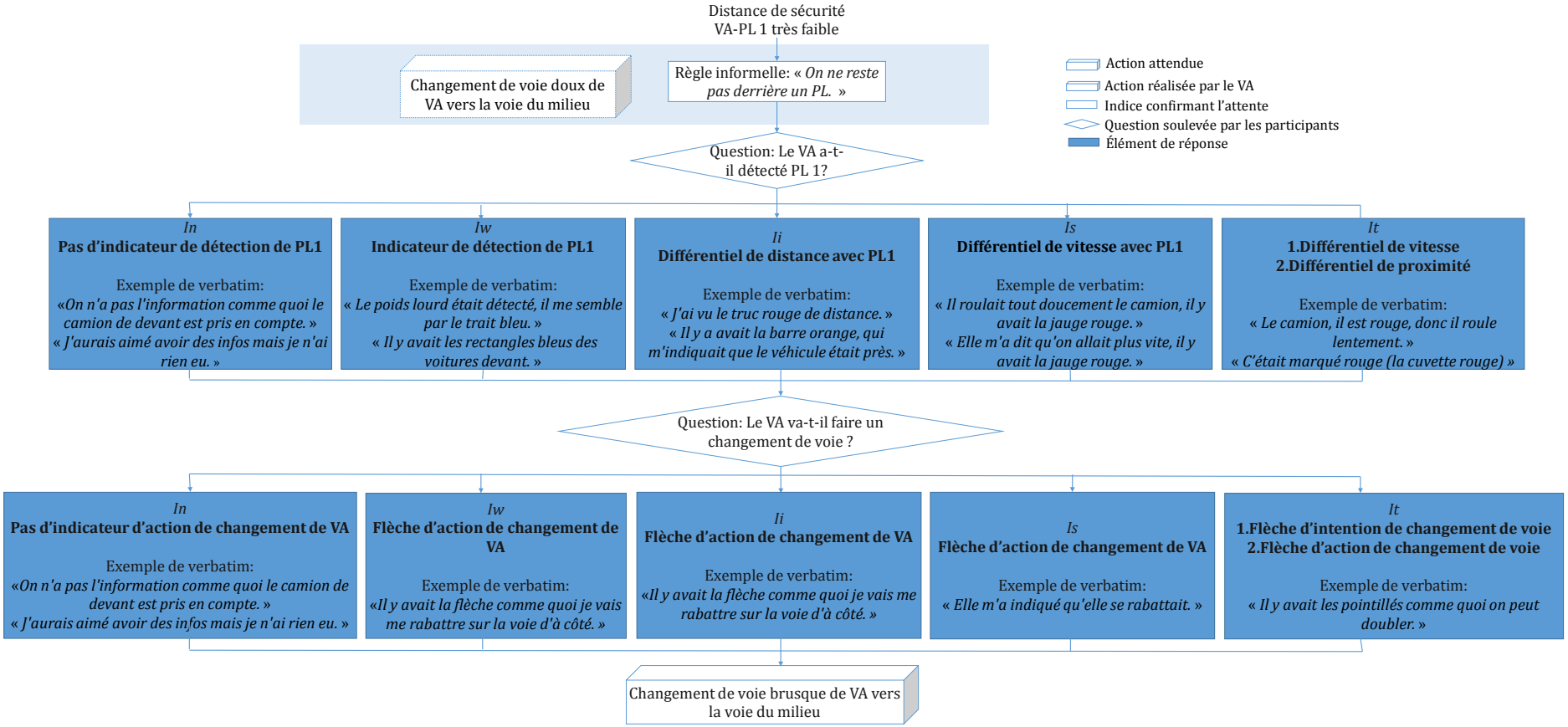


Figure 68 : Graphe d'analyse de la partie 1 de la scène 1 de dépassement avec les deux poids-lourds

Les résultats de l'analyse de la scène de virage et de changement de voie confirment, de façon descriptive, l'hypothèse 7 selon laquelle le besoin informationnel des agents humains est plus important dans une situation de changement de voie que dans celle de suivi notamment en ce qui concerne la prise de décision et l'analyse de l'information par la voiture autonome. En effet, le principe A2 selon lequel ***« Tout danger (menace) doit être indiqué de façon spécifique »*** est intéressant quand la voiture réalise un changement de voie. Afin de compléter ces résultats, nous présentons quelques résultats issus de l'analyse des questions provenant du questionnaire Q2, portant non seulement sur la compréhension des informations mais aussi sur l'utilité perçue de l'IHM dans le paragraphe suivant.

b) Les informations perçues

Comme nous l'avons annoncé, nous avons analysé les questions C7 et C9 du questionnaire Q2 renseigné à la fin de chaque roulage. Les autres questions, plus en rapport avec la confiance qu'avec le contenu IHM, sont traitées ultérieurement. Nous avons en particulier demandé à chaque participant à l'issue de chaque roulage, s'il y avait des informations qu'il avait trouvées particulièrement utiles dans l'IHM (question C7). Nous leur avons demandé d'en citer 4 en les classant. Seules les deux premières informations mentionnées par les participants, identifiées par *UI1* et *UI2,* ont été retenues parce que tous les participants ont au moins donné deux réponses. Par ailleurs, nous leur avons demandé s'il y avait des informations qui étaient absentes dans l'IHM mais qu'ils auraient voulu voir apparaître (question C9). Seule la première mentionnée comme étant absente mais utile a été retenue, parce que plusieurs participants n'ont donné qu'une réponse sur les quatre possibles. Celle-ci est repérée par *ANI*. Afin de faciliter la réalisation des graphiques, nous avons codé les informations mentionnées comme l'indique le Tableau 41. Quand le participant n'avait consigné aucune information pour *UI1, UI2* et *ANI*, cette absence d'information était identifiée par NA.

Tableau 41 : Tableau de sigles pour les informations IHM

Sigles	Significations	Traduction
Sp	(Ego Vehicle) Speed	Vitesse du véhicule autonome
LS	Legal Speed	Vitesse légale
LCi	Lane Change intent	Intention de changement de voie
LCm	Lane Change Maneuver	Action de changement de voie
SD	Speed Differential	Différentiel de vitesse
LA	Lane Avaibility	Disponibilité de la voie
AT	Action Table	Tableau à 9 cases
Vd	Vehicle blue detection	Détection bleue du véhicule
Bs	Blind Spot	Angle mort
Pd	Proximity differential	Différentiel de proximité
LCnd	Aborted LC decision	Décision de changement de voie abandonnée
AM	Autonomous mode	Mode autonome
Tt	Turn trait	Virage
TVd	Target Vehicle colored detection	Détection du véhicule cible en couleur
Lt	EV lane traits	Traits de la voie de la voiture autonome
BVd	Behind vehicle detection	Détection du véhicule à l'arrière
TVts	TV turn signal	Clignotant du véhicule cible
EVts	EV turn signal	Clignotant du véhicule autonome
GPSv	GPS voice	Voix de GPS
Evh	EV highway to take	Sortie à prendre par le véhicule autonome
Dvd	Dangerous Vehicle detection	Détection d'un véhicule dangereux
OEd	Other Vehicle-Ego Vehicle distance	Distance entre le véhicule autonome et un autre de l'environnement
Ted	Target Vehicle Ego Vehicle distance	Distance entre le véhicule cible et le véhicule

		autonome.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le paragraphe suivant.

i. Résultats

Les 5 histogrammes de *UI1* (première information jugée utile par les participants*)* en rapport avec les 5 modalités *In, Iw, Ii, Is* et *It* sont représentés dans la Figure 69. Dans toutes les modalités, la vitesse de la voiture autonome (*Sp*) est mentionnée comme très utile. Par ailleurs, dans les modalités *Iw*, *Ii* et *It,* l'action de changement de voie (LCm) est également considérée comme une information utile.

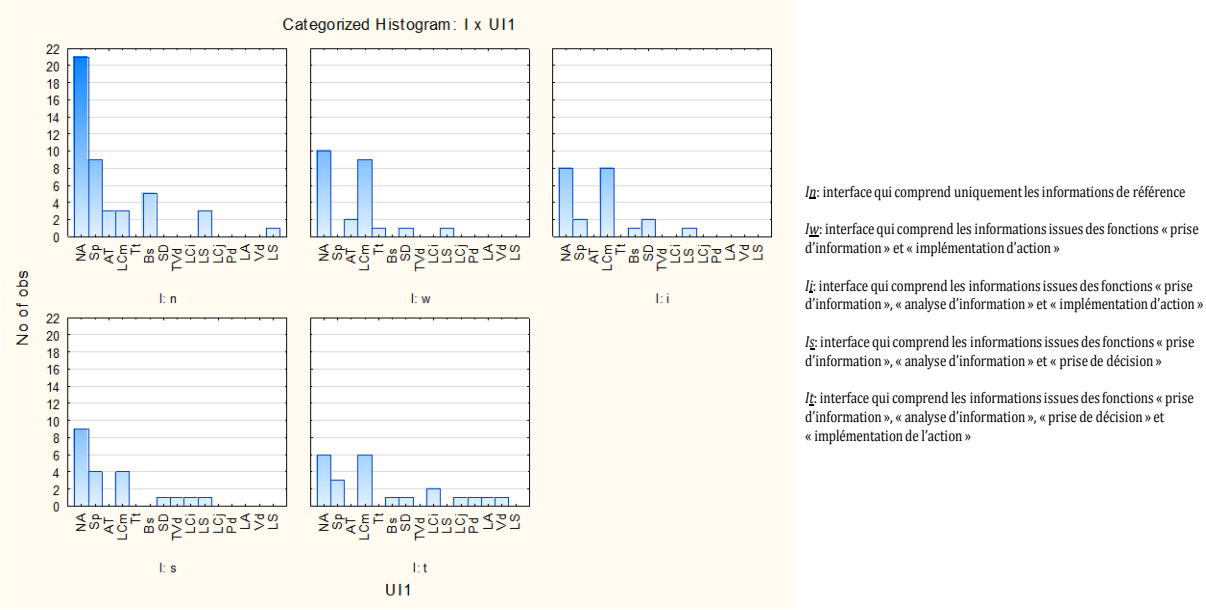


Figure 69 : Les informations utiles dans chaque IHM mentionnées en première position par les participants.

Les 5 histogrammes de *UI2* (deuxième information jugée utile par les participants) en rapport avec les 5 modalités *In, Iw, Ii, Is* et *It* sont représentés dans la Figure 70. Les résultats montrent que la vitesse de la voiture autonome (*S*) et l'action de changement de voie (*LCm*) font partie des informations les plus importantes dans toutes les IHM. En outre, dans les modalités *Ii, Is* et *It*, le différentiel de vitesse est souvent mentionné comme une information utile.

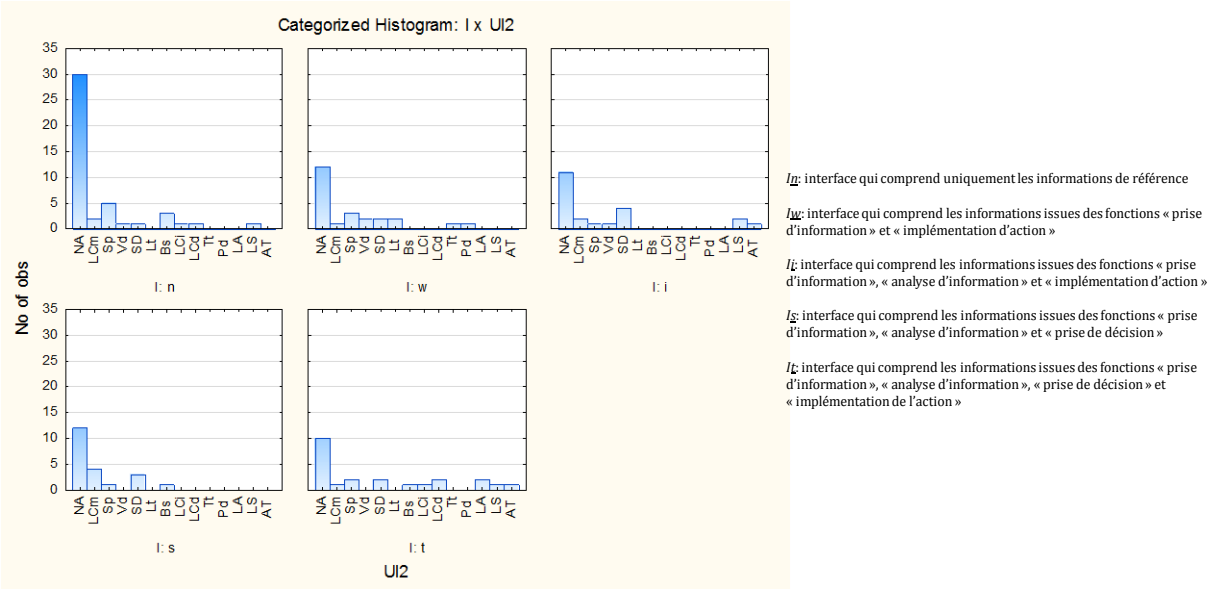


Figure 70: Les informations utiles dans chaque IHM mentionnées en deuxième position par les participants.

Les 5 histogrammes qui indiquent les informations manquantes mais nécessaires, *ANI,* en rapport avec les 5 modalités *In, Iw, Ii, Is* et *It* sont représentés dans la Figure 71. Dans toutes les modalités, des participants ont spécifié leur besoin de voir explicitement les vitesses des autres véhicules (*OVs*) et non pas le différentiel comme c'était le cas dans *Ii, Is et It. En* outre, dans toutes les interfaces, des participants ont souligné l'absence de clignotant de la voiture autonome (*EVts*) que les informations liées à l'implémentation de l'action de la voiture autonome (comme le tableau à 9 cases ou la flèche d'action de changement de voie) soient affichées ou pas. Pour information, le clignotant avait été désactivé pour ne pas entrer en interaction avec les informations de changement de voie données ou pas par les différentes IHM. Enfin, certains participants ont également évoqué la voix du GPS (*GPSv*) comme une information manquante mais utile.

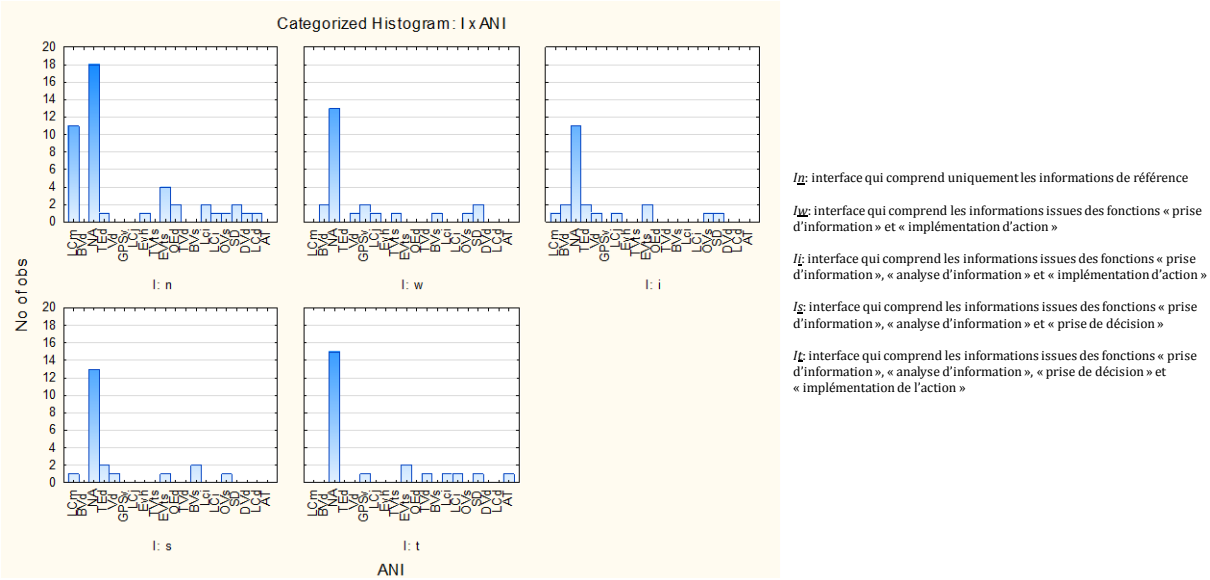


Figure 71 : Les informations absentes dans chaque IHM mais jugées importantes par les participants.

Ces résultats sont discutés dans les lignes suivantes.

ii. Discussion

La première information jugée importante par les participants, dans les interfaces *Is* et *It*, est l'action de changement de voie, *LCm* absente dans *Is* mais présente dans *It*. Ce résultat tend à valider le principe T1 selon lequel **« *dans le mode autonome établi, le conducteur doit être informé que l'automate contrôle la voiture en respectant les règles et pratiques de la conduite en vigueur (prédictibilité du comportement de la voiture). Par ailleurs, le conducteur doit être capable de détecter les actions (changement de voie, maintien, changements de vitesse) en cours de réalisation par la voiture et les comprendre.* »**

Parmi les informations absentes mais jugées nécessaires, les participants ont relevé :

1. L'action de changement de voie dans *In, Ii* et *Is* ;
2. Les cuvettes bleues pour indiquer que les véhicules environnants ont été détectées dans *In* ;
3. La distance entre le véhicule autonome et les autres véhicules dans *In* ;

Ces résultats confirment ceux qui ont été présentés précédemment et corroborent les travaux de WAGAR ET DIXON (2005) qui ont mis en lumière que dans un changement de paradigme de détection, l'absence des informations les plus importantes par les participants étaient plus aisément détectée que celle qui ne l'étaient pas. En d'autres termes, ces informations étaient restées plus en mémoire que les autres.

Plusieurs participants ont mentionné des informations comme étant présentes dans une modalité alors qu'elles étaient absentes et vice-versa. Ceci était plus remarquable lorsque cette modalité était jouée en deuxième ou troisième roulage. Par exemple dans *In,* modalité où aucune information n'est affichée, les premières informations jugées les plus utiles par certains participants sont le tableau à 9 cases (*AT*) et l'action de changement de voie (*LCm*). Dans la modalité *Is*, l'action de changement de voie (*LCm*) est mentionnée alors que seules l'intention et la décision de changement de voie étaient présentées. Le point commun entre le tableau à 9 cases et l'action de changement de voie est que ces informations appartiennent à la fonction « implémentation de l'action » pour valider le principe T1. Par conséquent, une hypothèse que nous pouvons émettre est que le principe T1 est pertinent, ce qui tend à confirmer les résultats issus de l'oculométrie.

Par ailleurs, près de 4% de ceux qui ont eu affaire à *In*, ont mentionné la flèche d'action de changement de voie (*LCm*) comme une information importante bien qu'elle ne figurait pas dans cette modalité. Dans *Iw*, les participants ont évoqué le différentiel de vitesse (*SD*) alors que cette information était absente. Ceci révèle donc que les vitesses des véhicules environnants étaient importantes pour les agents humains. Ceci est en phase avec les retours de plusieurs participants qui ont exprimé leur volonté de connaître les vitesses des véhicules environnants.

À la question de savoir quelles étaient les informations qui étaient absentes dans une IHM mais qu'ils jugeaient importantes, certains participants ont mentionné des informations comme étant absentes alors qu'elles étaient présentes en particulier dans le deuxième et dans le troisième roulage. Par exemple, dans près de 5 situations parmi les 23 situations de *It,* les participants ont mentionné que le tableau à 9 cases était absent dans cette interface malgré sa présence effective. Il serait intéressant de réaliser d'autres études pour comprendre ce résultat.

Nous passons à présent aux résultats issus de l'analyse de la *Situation Awareness*.

II.3 Situation Awareness

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre VI, la *Situation Awareness* était évaluée lors du premier roulage. Lors de ce roulage, le questionnaire Q1 (voir Annexe 3) était remis à chaque

participant au cours d'une phase de gel de la simulation. Le gel intervenait dans l'une des deux scènes de dépassement avec deux poids-lourds (t) ou de dépassement avec déboîtement soudain d'un véhicule (d). La sélection de l'une ou l'autre de ces deux scènes était faite de façon alternée. En d'autres termes, si le participant A était soumis à un gel dans la première scène, le participant B était soumis à un gel dans la deuxième. Dans chaque gel, les questions posées étaient relatives aux items suivants :

- G1 : Action du véhicule ;
- G2 : Contrôle longitudinal (accélération, décélération, vitesse constante) du véhicule ;
- G3 : Comparaison de la vitesse du véhicule avec celle de la vitesse limite ;
- G4 : Prédiction du comportement latéral du véhicule ;
- G5 : Nombre de véhicules devant le véhicule autonome ;
- G6 : Nombre de véhicules derrière le véhicule autonome.

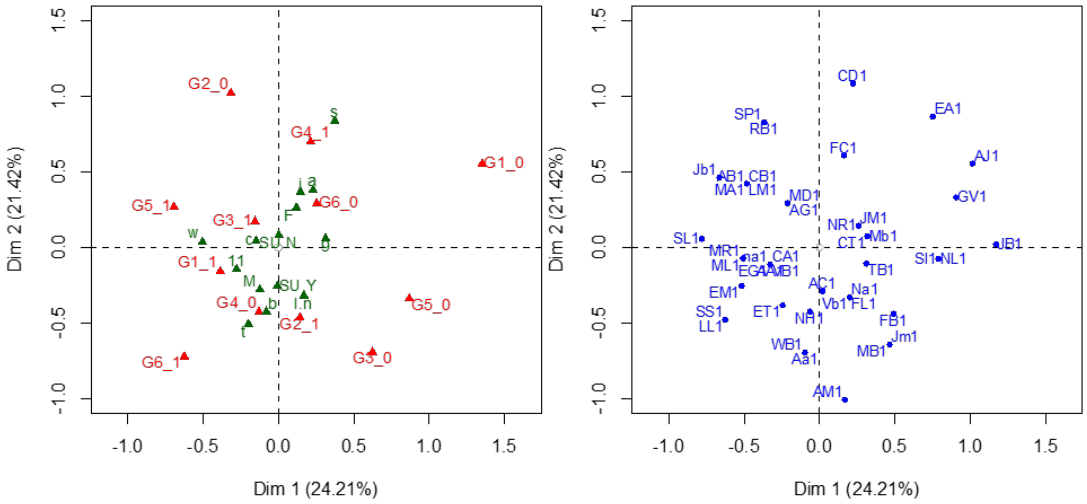
La réponse à chacune de ces questions (G1 à G6) a été codée en utilisant deux modalités : 0 et 1 qui correspondent respectivement à une réponse incorrecte et à une réponse correcte. Nous présentons dans les lignes suivantes, les résultats de notre analyse.

a) Résultats

Comme précédemment, une phase de codage a été réalisée. Elle a conduit à élaborer une table Y1 avec :

- 45 lignes. Ce nombre correspond à l'ensemble des premiers roulages réalisés par les 45 participants. En effet, la *Situation Awareness* a été évaluée grâce à un questionnaire renseigné par chaque participant durant le roulage 1 (DN1) uniquement.
- 12 colonnes. Ce nombre correspond à l'ensemble des modalités associées à chacune des six questions (G1 à G6) sachant que chaque réponse a été codée par 1 quand la réponse était correcte et à 1, sinon. Ce qui correspond bien à 12 (6*2) modalités, soit 12 colonnes.

L'ACM de Y1 montre que les fréquences des deux modalités 0 et 1 peuvent être très différentes (Figure 72.a). Par exemple, le nombre d'occurrences des modalités 0 et 1 pour G1 (action du véhicule) est respectivement égal à 10 et 35. La Figure 72.a montre une opposition principale entre les réponses incorrectes figurant à droite, et les réponses correctes figurant à gauche, sauf pour la question G4 qui invitait le participant à projeter le comportement de la voiture autonome. Dans la Figure 72.b, un point correspond à la séquence de réponses aux 6 questions (G1 à G6) d'un participant à une question dans le premier roulage. Par conséquent, des points qui se situent à la même position signifie que les participants associés à ces points ont donné des réponses identiques aux 6 questions. Par exemple, la séquence de réponses « 111011 » pour les 6 questions G1 à G6 est identique pour les points (participants) LL1 et SS1 à l'angle gauche en bas. La Figure 72.a, qui affiche aussi les modalités du facteur (en utilisant des points-colonnes supplémentaires), montre des effets faibles.



(a) (b)

Figure 72 : L'ACM des variables du questionnaire Q1 obtenu à partir du tableau Y1. a) Projection des points-colonnes correspondant aux 12 modalités liées aux questions G1 à G6 et les facteurs principaux. b) Projection des 45 points-lignes correspondant au premier roulage des 45 participants.

Les résultats précédents sont confirmés par la

Figure *73*. Dans cette figure, nous présentons les tests d'hypothèses de khi carré qui ont été réalisés pour évaluer l'impact des facteurs « Interface (I) », « Scénario (S) », « scène de gel (SF) », « genre (G) » et « Utilisation du simulateur (SU) » sur le taux de bonnes réponses aux différentes questions de Q1. Chaque ligne correspond à chacune des questions du questionnaire, et chaque colonne correspond à chacun des 5 facteurs. Les barres en cyan montrent l'histogramme des bonnes réponses (0 : aucune bonne réponse) pour chacune des 30 paires facteur/variable et les graphes en rouge montrent les valeurs de *p* sachant que le test est significatif lorsque cette valeur est inférieure à 0.05.

Figure 73. Tests d'hypothèses pour évaluer l'impact des facteurs I, S, SF, G et SU sur le questionnaire G dans un contexte inférentiel. (I : Interface, S : scenario, SF : scènes de gel, G : genre, SU : utilisation d'un simulateur avant l'expérience)

Nous discutons les effets des facteurs les plus significatifs, c'est-à-dire pour lesquels $p<0.05$, dans le paragraphe suivant.

b) Discussion

Les participants donnaient généralement de mauvaises réponses à G4. En d'autres termes, ils parvenaient rarement à prévoir le comportement à venir de la voiture autonome. Une explication possible est qu'ils n'avaient pas une connaissance suffisante du système pour prédire son fonctionnement.

Les facteurs « Scénario », « Scène de gel », « Genre » et « Utilisation d'un simulateur » ne donnent que peu de résultats significatifs, et difficilement interprétables, comme par exemple le fait que les hommes donnent de meilleurs résultats à la question G1 qui demandait aux participants d'indiquer, parmi les actions suivantes, celle qui était en cours de réalisation par la voiture autonome : suivi de voie, changement de voie vers la gauche et changement de voie vers la droite.

Nous avons relevé qu'il y a un effet significatif de la variable « Interface » sur la question G2 qui invitait les participants à déterminer la dynamique de la voiture autonome, c'est-à-dire à identifier si la voiture autonome accélérait, décélérait ou avait une vitesse constante. À cette question, le nombre de bonnes réponses était très faible dans *In* (interface de référence) et le nombre le plus élevé de bonnes réponses était observé dans *Iw* (affichant des informations relevant de la prise d'informations et de l'implémentation de l'action). En d'autres termes, l'interface présentant des éléments relatifs à la prise d'information et à l'implémentation de l'action, permet aux participants de mieux percevoir la dynamique du véhicule autonome que celle qui ne présente aucun de ces éléments. Un des éléments spécifiques dans *Iw* qui met en évidence la dynamique du véhicule autonome est le tableau à 9 cases, ce qui tend à valider le principe de transparence T1 qui stipule que ***« le conducteur doit être capable de détecter les actions (changement de voie, maintien, changements de vitesse) en cours de réalisation par la voiture et les comprendre »***.

De même, il y a un effet significatif de I sur G6 (nombre de véhicules derrière le véhicule autonome). À cette question, le nombre de bonnes réponses était très faible dans *Is* et le nombre le plus élevé de bonnes réponses était observé dans *Iw*. En d'autres termes, avec l'IHM mettant en évidence la prise d'information et l'implémentation de l'action (*Iw*), les participants percevaient mieux le nombre de véhicules derrière le véhicule autonome qu'avec l'IHM où non seulement les résultats de la prise d'information et de l'analyse de l'information sont présentés mais aussi ceux de la prise de décision (Is). Ce résultat est d'autant plus surprenant que dans *Is*, il y avait des explications relatives à la présence d'un véhicule de police ou un véhicule arrivant rapidement à l'arrière, ces deux événements se produisant dans l'une des deux situations où il y a eu gel. Nous faisons l'hypothèse que cette IHM, présentant de nombreuses informations, a provoqué une surcharge informationnelle. En effet, comme l'ont mentionné BAWDEN ET ROBINSON (2009), une quantité élevée d'informations sur une interface peut amener un utilisateur à ne pas toutes les lire, notamment en cas de fortes contraintes temporelles. Il est également possible que les participants n'aient pas compris les icônes de justification liées au changement de voie, comme l'arrivée d'un véhicule d'un véhicule rapide à l'arrière de la voiture autonome.

Ces deux résultats tendent à valider l'hypothèse 1 selon laquelle des solutions de transparence différentes entraînent des différences dans la représentation de la situation que les agents élaborent. En résumé, en analysant les variables liées aux activités cognitives des participants, *Iw* (IHM qui met en évidence les informations relatives à la prise d'information et à l'implémentation de l'action) est celle qui permet d'aboutir à de meilleurs résultats du point de vue de la *Situation Awareness*.

Outre le facteur « Interface », les facteurs « Scène de gel » et « Genre » ont eu des effets significatifs sur la *Situation Awareness* qu'il semble intéressant de discuter. En ce qui concerne le facteur « Scène de gel », il a eu un effet significatif sur la question G6. Dans la scène de dépassement avec déboîtement, les participants arrivaient moins bien à identifier le nombre de véhicules qu'il y avait devant la voiture autonome que dans la scène de dépassement avec les deux poids lourds. Nous faisons l'hypothèse que le déboîtement du véhicule s'est fait si rapidement que les participants ne s'en sont pas rendu compte. Le facteur « Genre », quant à lui, a eu un effet significatif sur la question G1. En effet, les hommes parvenaient significativement

mieux à identifier l'action de la voiture autonome que les femmes. Nous n'avons pas d'emblée d'explication à cette différence de résultats. Davantage de recherches restent nécessaires.

L'analyse des variables liées aux activités cognitives, dont les principaux résultats sont présentés dans le Tableau 42, nous a permis d'avoir des tendances positives en faveur des principes de transparence. Nous présentons dans la section suivante les résultats de l'analyse des variables de l'expérience utilisateur.

Tableau 42 : Résumé des résultats relatifs aux activités cognitives

Rappel de l'identification des IHM
In: interface qui comprend uniquement les informations de référence *Iw*: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information » et « implémentation d'action » *Is*: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse d'information » et « prise de décision » *It*: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse d'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action »
Résultats relatifs aux données oculométriques
1. Il y a eu un nombre de fixations dans l'afficheur tête haute sans réalité augmentée plus élevé dans *It* – mettant en évidence les informations issues de la prise d'information, l'analyse de l'information, la prise de décision et de l'implémentation de l'action- que dans *In* – ne mettant en évidence que les informations de référence, dans la scène de séparation d'autoroute. 2. Il y a un nombre très peu élevé de fixations sur le rétroviseur gauche dans la scène avec la séparation d'autoroute, alors que dans la scène de changement de voie avec les deux poids lourds, ce nombre est plus important. 3. Le nombre de fixations était légèrement plus important dans la scène de dépassement avec les deux poids-lourds que dans celle caractérisée par la séparation d'autoroute.
Résultats relatifs au contenu IHM
1. Dans la scène de virage, l'indication de virage est signalée comme une information manquante dans *In* contrairement aux autres IHM où elle était présente. 2. La première information jugée importante par les participants, dans les interfaces *Is,* mettant en évidence les informations issues de la prise d'information, de l'analyse d'information et de la prise de décision et *It*, est l'action de changement de voie. 3. Parmi les informations absentes mais jugées nécessaires, les participants ont relevé : a. L'action de changement de voie dans *In, Ii* et *Is*. b. Les lignes bleues pour indiquer que les véhicules environnants ont été détectées dans *In*. La distance entre le véhicule autonome et les autres véhicules dans *In* ;
Résultats relatifs à la *Situation Awareness*
1. À la question qui invitait les participants à déterminer la dynamique de la voiture autonome, c'est-à-dire à identifier si la voiture autonome accélérait, décélérait ou avait une vitesse constante, le nombre de bonnes réponses était significativement plus faible dans *In* que dans *Iw*. 2. À la question qui invitait les participants à indiquer nombre de véhicules derrière le véhicule autonome, le nombre de bonnes réponses était significativement plus faible dans *Is* que dans *Iw*.

III. Analyse des variables liées à l'expérience utilisateur

L'expérience utilisateur correspond au ressenti de l'utilisateur au cours de l'expérimentation selon la norme ISO 9241-210 dans sa version de 2009. Elle inclut le sentiment de confort, de confiance et la satisfaction perçus par les différents agents humains. Dans les lignes qui suivent, nous explorons en détail les résultats liés à cette expérience.

III.1 Sentiment d'inconfort et sentiment de confiance

Chaque participant avait la possibilité d'appuyer sur un bouton quand une situation de conduite lui paraissait inconfortable (cf. chapitre VI). En ce qui concerne le questionnaire Q2 sur la confiance, chaque participant devait le remplir à la fin de chaque roulage. Ce questionnaire comportait 10 questions dont huit ont été analysées en rapport avec l'expérience utilisateur :

- C1 : Compréhension de la manière dont fonctionne l'IHM ;
- C2 : Caractère plaisant de l'IHM ;
- C3 : Compréhension de l'IHM ;
- C4 : Prédiction de l'action de l'automate ;
- C5 : Compréhension de l'action de l'automate ;
- C6 : Compréhension de l'environnement de conduite ;
- C7 : Caractère utile de l'interface (oui ou non) ;
- C8 : Présence d'informations inutiles dans l'interface (oui ou non) ;
- C9 : Absence d'informations nécessaires (oui ou non) ;
- C10 : Confiance du participant en lui-même.

Pour ces questions, une échelle visuelle analogique linéaire, dont les réponses ont été recueillies à partir d'une échelle de valeur constituée par une ligne de 10 cm indiquant aux deux extrémités des opinions opposées, a été utilisée (RUDE & RETEL, 2000, P. 47). L'intégralité du questionnaire peut être consultée dans l'annexe 4.

Nous avons considéré que les réponses à ce questionnaire relèvent de l'expérience utilisateur parce que l'évaluation de la compréhension est subjective et se fait quelques minutes après le dernier roulage. Il s'agit donc d'un ressenti. Certes, certaines questions peuvent être identifiées comme étant liées à l'Expérience Utilisateur et aux activités cognitives comme C1, C3, C4, C5, C6 notamment. Cependant, pour éviter de faire un arbitrage non rigoureusement soutenu, nous avons analysé simultanément ces questions simultanément.

a) Résultats

Il y avait des réponses manquantes pour les questions C3, C6, C7 et C10 (avec respectivement 3, 1, 5 et 11 réponses manquantes). L'échelle de ces questions étant quantitative, une quatrième modalité (ND), qui permettait de référer à l'absence de réponses, a été ajoutée aux trois modalités floues définies : *l* (faible), *m* (moyenne) et *h* (élevée) (Figure 74).

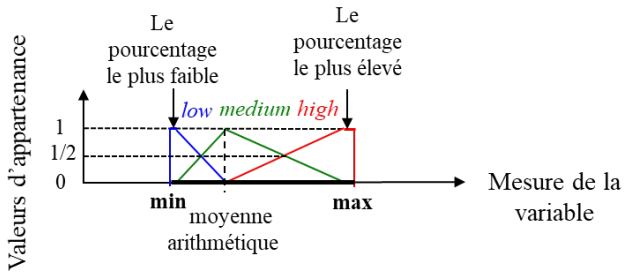


Figure 74 : Valeurs d'appartenance pour les modalités floues

La phase de codage a permis d'obtenir un tableau Y2 comportant :

- 135 lignes. Ce nombre correspond aux 135 roulages analysés étant donné que chacun des 45 participants a effectué 3 roulages.
- 35 colonnes. Ce nombre correspond :
  - À l'ensemble des modalités de réponse aux questions quantitatives C3, C6, C7 et C10 qui ont chacune 4 modalités (*l, m, h* et *AD*) soit un total de 16 colonnes correspondant aux 16 (4*4) modalités.
  - À l'ensemble des modalités de réponse aux questions quantitatives C1, C2, C4, C5 et BP qui ont chacune 3 modalités (*l, m* et *h)* soit un total de 15 colonnes correspondant aux 15 (5*3) modalités.
  - À l'ensemble des modalités associées aux questions C8 et C9 qui ont chacune 2 modalités (*Y* et *N*) soit un total de 4 colonnes correspondant aux 4 (2*2) modalités.

Comme nous l'avons déjà évoqué dans l'analyse des données oculométriques, l'une des étapes incontournables - une fois que les données ont été classées - est de déterminer les axes principaux qui vont orienter l'analyse. L'ACM de Y2 a permis de déterminer 4 axes principaux ayant une contribution respective de 26%, 13%, 8% et 7% à la variance totale. L'analyse de ces résultats montre que les modalités *faible* et *élevé* ont une forte contribution dans le plan principal constitué des axes principaux. En effet, les modalités qui ont une forte contribution dans le plan principal sont par ordre décroissant *C5h, C4h, C4l, C6h, C2h, C5l, C10h* et *C6l*. Par ailleurs, des relations presque linéaires entre les différentes variables sont mises en évidence, comme le montre la Figure 75.a. La Figure 75.b ne montre aucune valeur ni classe aberrante. Pour montrer les effets des facteurs, les profils de moyenne correspondante peuvent être calculés et projetés directement sur le plan principal en utilisant le concept de points supplémentaires (voir Annexe 5). Afin d'expliciter la démarche utilisée, prenons l'exemple de la modalité « 1 » du facteur « DN », c'est-à-dire le premier roulage. Les trois étapes suivies ont été les suivantes :

1. Les 45 premiers roulages ont été sélectionnés à partir du tableau Y2, c'est-à-dire les 45 premières lignes et les 35 colonnes associées.
2. Le calcul des moyennes des valeurs d'appartenance correspondant aux différentes variables donne un ensemble de valeurs consignées dans une nouvelle ligne insérée en-dessous des 135 premières lignes du tableau Y2.
3. Le point correspondant à cette nouvelle ligne est ensuite projeté dans le plan principal.

À l'issue des analyses, il apparait que les points DN1, DN2 et DN3 correspondant respectivement au 1er, 2ème et 3ème roulage sont très proches. Par conséquent, l'effet du facteur « Roulage » est très faible, de même que ceux des facteurs « Scénario », « Interface » et « Gel ». Cependant, la Figure 75.c montre que parmi ces quatre facteurs, l'effet le plus évident est tout de même celui de DN : les participants donnent des scores d'autant plus élevés aux questions qu'ils ont fait

l'expérience d'un nombre important de roulages. Par exemple, les scores dans le roulage 3 sont plus élevés que ceux attribués au roulage 2. Par ailleurs, la Figure 75.c montre également que *Ii*, qui présente les informations issues des fonctions « Prise d'information », « Analyse de l'information » et « Implémentation de l'action », et *In*, les informations de référence uniquement, sont les interfaces les plus distantes l'une de l'autre, sachant que *In* est l'interface qui donne les valeurs les plus faibles par rapport à l'axe 1 (pour les questions C4, C5 et C6 par exemple). La Figure 75.d montre le cas où les facteurs « Interface » et « Scénario » sont combinés. Les effets constatés de ces facteurs sont également très bas.

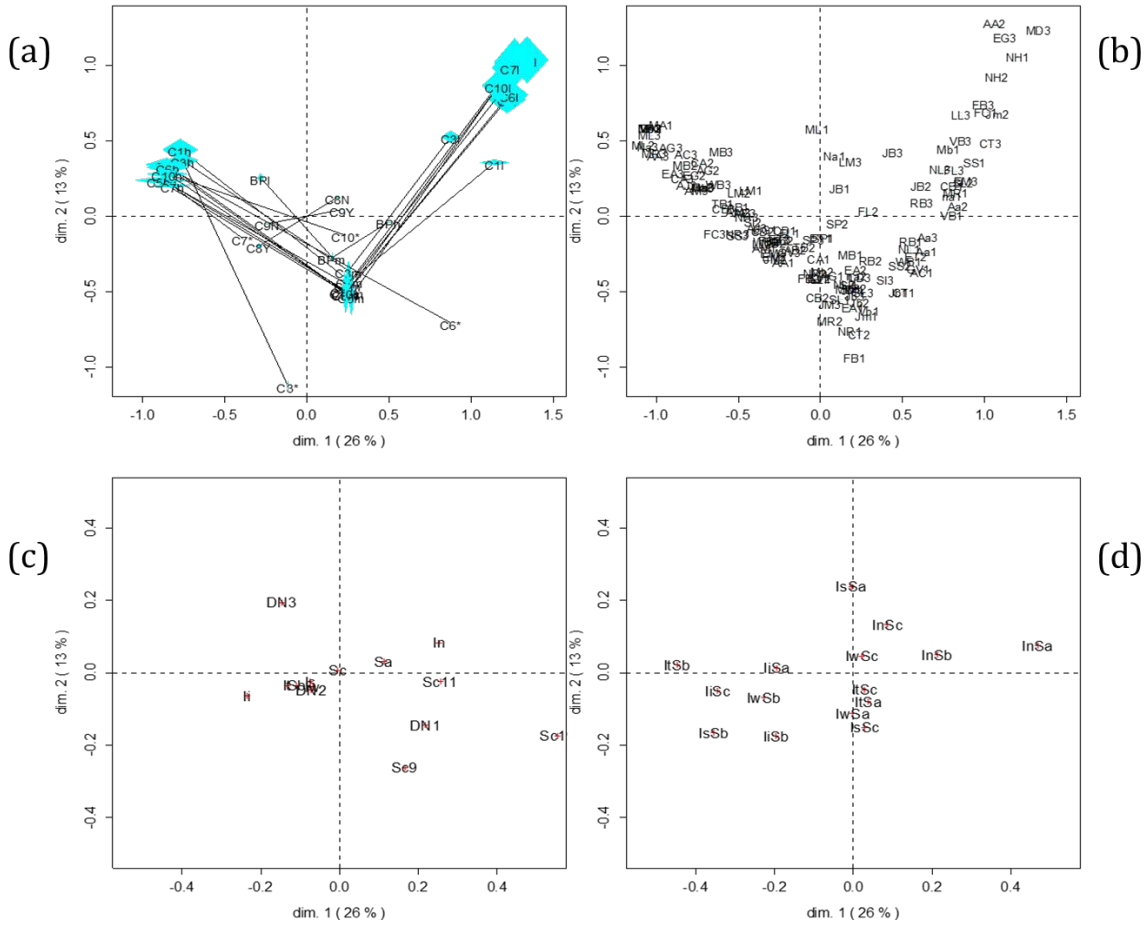


Figure 75 : ACM des variables BP et du questionnaire C obtenu à partir du tableau Y2. a) Projection des 35 points-colonnes correspondant aux 35 modalités b) Projection des 135 points-lignes correspondant aux 3 roulages des 45 participants. c) Projection des lignes supplémentaires des profils de moyenne correspondant aux 3 roulages, les 3 scénarios de conduite, les 5 interfaces (et les 2 scénarios dans lesquels il y a eu gel de la situation, d) des lignes supplémentaires des profils de moyenne

Afin d'établir les corrélations entre les variables d'une part, et entre une variable et un facteur d'autre part, plusieurs graphiques ont été réalisés et sont présentés dans la Figure 76. Nous avons porté une attention particulière aux scores associés à la question C4 qui concernait la contribution de l'IHM à la prédiction des actions de la voiture autonome. Nous nous sommes intéressés à cette question pour évaluer l'impact de l'IHM sur la capacité du participant à anticiper le comportement de la voiture. Dans chacun de ces graphiques, les scores sont représentés par des ronds.

- La Figure 76.a confirme le modèle linéaire existant entre C4 et C5 qui est la question en rapport avec la compréhension de l'action de l'automate (ces deux variables ayant les

plus grandes contributions à l'axe 1). En effet, le nuage de points associés à ces deux variables forme une ligne, caractéristique d'une linéarité.

- La Figure 76.b met en évidence un nuage disparate de points en fonction de la variable BP, le nombre d'appuis boutons en rapport avec le sentiment d'inconfort ressenti par les participants. Ainsi, il n'y a aucune relation entre C4 et BP.
- La Figure 76.c met en évidence un nuage disparate de points en fonction de la variable C9, question qui amenait les participants à préciser si dans l'IHM, étaient absentes des informations qu'il jugeait nécessaires. Ainsi, il n'y a aucune relation entre C4 et C9.
- La Figure 76.d, e, et f sont des boîtes à moustaches qui permettent de voir aisément la manière dont les scores donnés à la question C4 sont considérés respectivement par rapport aux modalités des facteurs « Roulage », « Scénario » et « Interface ». La tendance centrale des valeurs de chaque boite peut être déterminée en observant la position de la médiane (trait noir dans chacune des boîtes). Les différentes médianes dans ces figures, sont quasiment au même niveau, confirmant les faibles effets des facteurs « Roulage », « Scénario » et « Interface ». En particulier, les faibles scores pour C4 sont observés dans le premier roulage DN1, dans le scénario *Sa* et dans l'interface *In*.

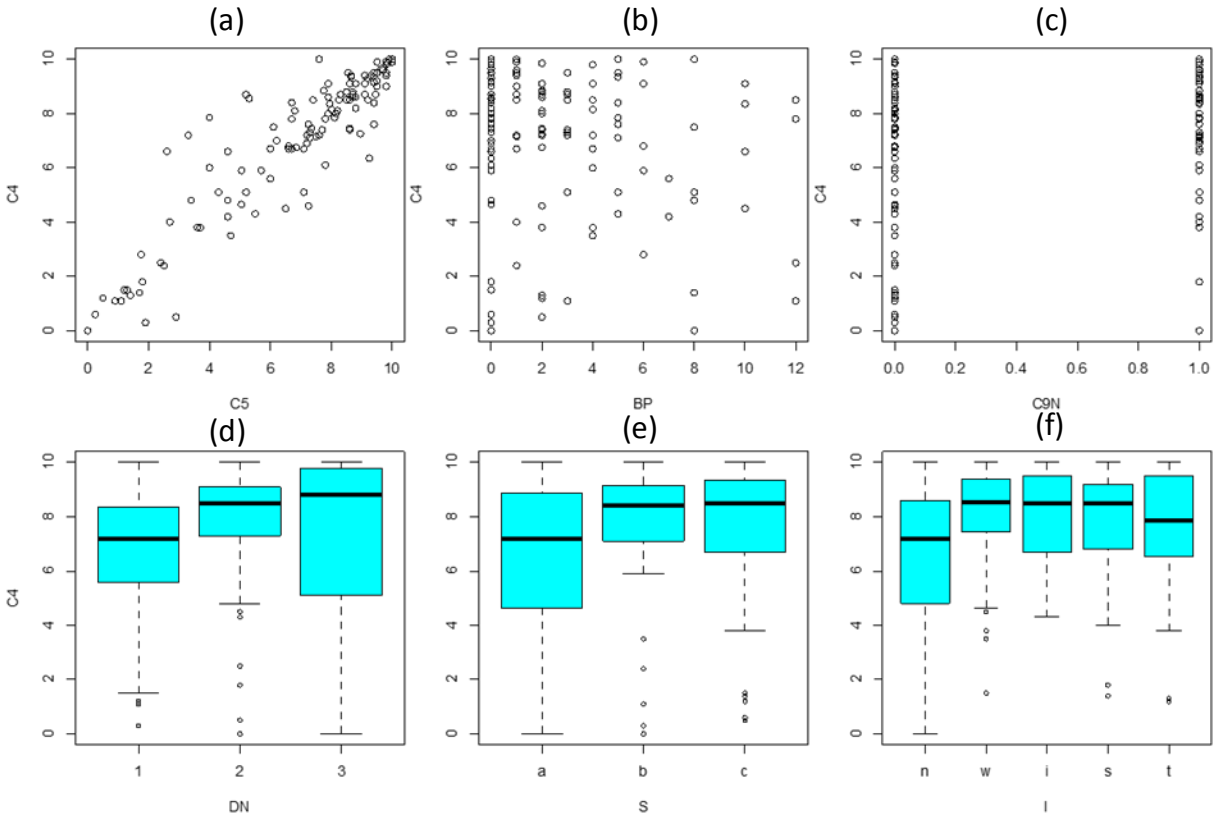


Figure 76 : Quelques graphiques pour montrer de façon plus directe la sortie de l'ACM (voir Figure 6). La première ligne montre la présence (a) ou l'absence (b et c) de plusieurs relations. La dernière ligne montre le faible effet des facteurs.

La présence de données éloignées de la distribution gaussienne a nécessité de recourir au test de Friedman pour les facteurs « Roulage » et « Scénario ». Dans la Figure 77, les inscriptions à côté des barres, quand elles existent, décrivent le résultat des tests post-hoc avec une valeur de *p* plus grande que 0,05. La Figure 77 confirme deux résultats :

1. L'effet du facteur « Roulage » est plus élevé que celui du facteur « Scénario ».

1. Le nombre d'appuis boutons est moins influencé par les facteurs « Scénario » et « Roulage » que les questions C1 à C7[45] et la question C10[46].

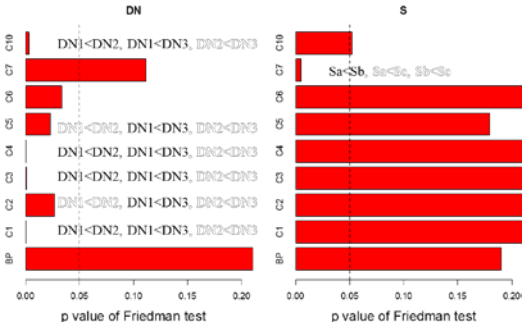
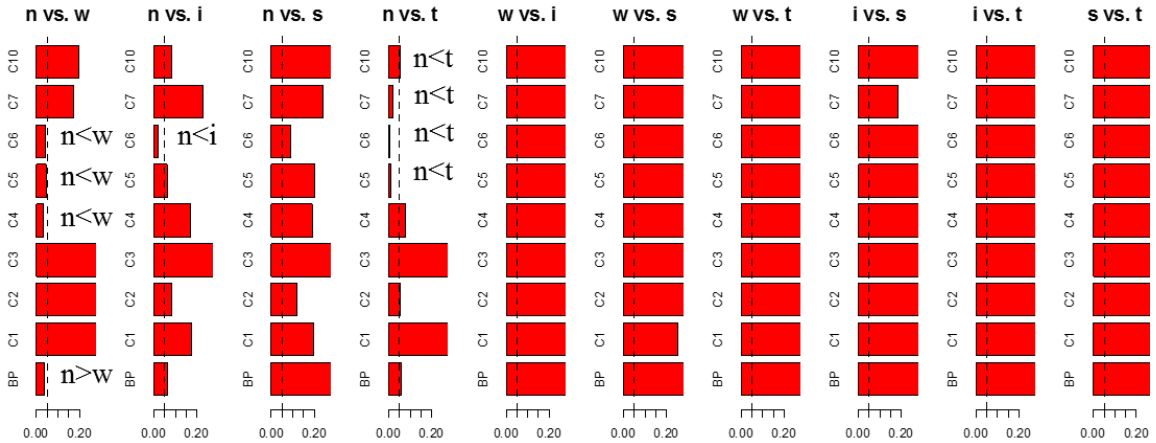


Figure 77 : Les tests d'hypothèses pour évaluer les effets des facteurs DN et S sur les sorties de l'ACM (voir Figure 75) dans un contexte d'inférence.

En ce qui concerne l'effet du facteur « Interface », nous souhaitons rappeler que les 5 modalités n'ont pas été testées par chaque participant (seule la modalité *In* a été testée par les 45 participants). Par ailleurs, pour certaines situations expérimentales, il y avait des données manquantes. Dans une perspective inférentielle, les dix paires d'IHM *(« In vs Iw », « In vs Ii», « In vs Is», …)* ont été évaluées avec le test de Wilcoxon (avec l'option appariée) où, s'il y avait une case avec une donnée manquante dans une paire de données, cette paire est supprimée. Chacun des 10 tests appariés a été réalisé pour environ une douzaine de paires de données. La Figure 78 qui a été construite avec le même modèle graphique que la Figure 77, confirme les résultats de l'ACM (cf. Figure 75.c) notamment le fait que le facteur « Interface », a de façon générale, un effet plutôt faible sur les variables dépendantes. En effet, il n'y a que 9 différences significatives sur les 90 comparaisons réalisées.



[45] C1 : question relative à la compréhension de la manière dont fonctionne l'IHM ;
C2 : question relative au caractère plaisant de l'IHM ;
C3 : question relative à la compréhension de l'IHM ;
C4 : question relative à la prédiction de l'action de l'automate ;
C5 : question relative à la compréhension de l'action de l'automate ;
C6 : question relative à la compréhension de l'environnement de conduite ;
C7 : question relative au caractère utile de l'interface (oui ou non) ;
[46] C10 : question relative à la confiance du participant en lui-même.

Figure 78 : Tests d'hypothèses pour évaluer l'effet du facteur I sur les sorties de l'ACM (voir Figure 75) dans un contexte inférentiel.

Ces résultats sont discutés ci-après.

b) Discussion

Nous reviendrons, dans cette section, sur les résultats les plus significatifs. Nous mettrons en évidence par ailleurs l'effet des facteurs « interface », « roulage » et « scénario » sur les sentiments d'inconfort et de confiance.

i. Effet du facteur « Interface »

L'interface a eu un impact significatif non seulement sur le sentiment d'inconfort mais aussi sur la confiance.

De façon générale, *In* est l'interface qui génère le plus d'appuis boutons. On note, en particulier, une différence significative entre *In* et *Iw* sur le sentiment d'inconfort. Les résultats ont montré qu'avec *In* - qui ne contenait que les informations de référence - le sentiment d'inconfort était plus élevé qu'avec *Iw* qui contenait en plus des informations de base, les informations de « prise d'information » et « implémentation de l'action ». Ce résultat tend donc à valider le principe T1 en rapport avec le contrôle de la voiture autonome et le principe E1 en rapport avec la prise d'informations des objets par la voiture autonome.

Le résultat montrant l'intérêt du principe E1 corrobore quelques travaux issus de la littérature. En effet, ORON-GILAD ET HANCOCK (2008) ont précisé que le comportement de l'agent technique doit être transparent en termes de perception pour permettre à l'agent humain d'être rassuré quant au fait que la voiture autonome a bien perçu les éléments de son environnement. L'agent humain, ne sachant pas si l'agent technique a correctement perçu les éléments importants de son environnement, ressentirait un sentiment d'inconfort.

Pour les questions C4 à C6, il y a une différence significative entre *In* et *Iw.* En effet, pour chacune de ces questions, les scores étaient plus bas dans *In* que dans *Iw*. Ceci veut dire en particulier que :

1. Les participants parviennent significativement mieux à prédire l'action de l'automate avec *Iw* qu'avec *In*.
2. *Iw* facilite significativement plus la compréhension de ce que fait le système que *In*. Étant donné que *Iw* présentait les actions de la voiture autonome qui étaient absentes dans *In*, notre hypothèse est qu'afficher les actions favorise la compréhension de l'automate par l'agent humain.
3. *Iw* facilite significativement plus la compréhension de l'environnement de conduite que *In*. En effet, *Iw* mettait en évidence les éléments de prise d'information absents dans In, notamment l'annotation des bords de voie et des véhicules environnants.

Pour la question C6, il y a également une différence significative entre *In* et *Ii*, le score étant plus bas dans *In* que dans *Ii*. Ceci signifie que *Ii* facilite significativement plus la compréhension de l'environnement de conduite que *In*. Ce résultat n'est pas surprenant dans la mesure où *Ii* affiche les éléments de « prise d'information » absents dans *In*, donnant des éléments positifs à la validation du principe E1.

Pour les questions C5, C6, C7 et C10, il y a une différence significative entre *In* et *It* ; les scores étant plus bas dans *In* que dans *It*. Ceci veut dire en particulier que :

1. *It* facilite significativement plus la compréhension de ce que fait le système que *In*.

2. *It* facilite significativement plus la compréhension de l'environnement de conduite que *In*.
3. *It* paraît significativement plus utile que *In*.
4. Les participants étaient significativement plus confiants avec *It* qu'avec *In*.

Les différences en termes d'informations entre les deux interfaces portant à la fois sur la prise de décision et l'implémentation de l'action, ces résultats ne permettent pas de conclure de façon spécifique sur la plus-value d'un ou de plusieurs principes. Ces résultats montrent néanmoins que les informations relevant de chacune des quatre fonctions « prise d'informations », « analyse d'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action » augmentent la confiance par rapport à ce qui est observé avec l'interface de référence. Ce résultat corrobore les travaux de LEE ET SEE (2004) qui ont mentionné que la transparence est un facteur exogène de la confiance en l'automate. De plus, il apparaît que *In,* qui rend le fonctionnement de l'automate opaque, est rejetée par les participants.

De façon générale, *In*, avec les informations de référence uniquement, est celle qui limite la compréhension de l'environnement et celle de l'automate. De plus, elle est perçue comme la moins utile. Ainsi, n'afficher que la vitesse, l'information de Blind Spot, le mode actif de la voiture et l'itinéraire n'est pas celle qui favorise le plus la construction de la représentation mentale de l'environnement de conduite et de l'automate. Il est au moins nécessaire de mettre en évidence les informations issues de la prise d'information, de l'analyse de l'information et de l'implémentation de l'action.

En résumé, les effets du facteur « Interface » corroborent, pour la plupart, les hypothèses 4, 5 et 6 selon lesquelles respectivement :

1. L'interface suscite un niveau de confiance différent en fonction de la transparence de la voiture autonome qu'elle laisse paraitre.

2. *In* est associé au plus haut niveau de stress et d'inconfort comparativement aux autres interfaces.

ii. *Effet du facteur « Roulage »*

Le facteur « Roulage » a eu des effets significatifs sur *C1, C2, C3, C4, C6* et *C10*. En effet, à travers les 3 roulages, chaque participant a appris comment le véhicule autonome fonctionnait. En d'autres termes, il a acquis de l'expérience avec le véhicule. Un participant a explicitement mentionné le fait que, lors du premier roulage, il évaluait le véhicule pour savoir s'il devait rouler comme il l'aurait fait en situation réelle. À la fin du deuxième roulage, ce participant a mentionné avoir compris comment fonctionnait le véhicule. Le troisième roulage lui a permis de valider la consistance du fonctionnement du véhicule autonome, c'est-à-dire que dans ce roulage, il voulait répondre à la question « le véhicule autonome fonctionne-t-il de la même façon dans des situations similaires ? » La relation entre le facteur « Roulage » et le questionnaire Q2 peut être perçue comme la relation entre l'expérience avec le véhicule autonome et la confiance acquise, qui représente l'évaluation que l'agent humain fait de l'automate sur la base de son expérience passée et de l'interaction présente. En effet, le participant a une expérience plus élevée avec l'automate dans le 3ème roulage, que dans le 2ème roulage et, a fortiori, dans le 1er roulage. Ces résultats sont en phase avec ceux de YULIVER-GAVISH ET GOPHER (2011) qui ont trouvé que les participants ont une propension à faire confiance après qu'ils ont acquis de l'expérience avec l'automate. Les résultats de YULIVER-GAVISH ET GOPHER (2011) sont similaires à ceux de MANZEY, REICHENBACH ET ONNASH (2012) qui ont montré l'effet positif de l'expérience passée avec l'automate sur la confiance. Cependant, il faut préciser que cette observation suppose une expérience positive du participant avec le véhicule autonome ;

une expérience négative conduirait à un effet opposé comme le précisent BAILEY ET SCERBO (2007).

iii. Effet du facteur « Scénario »

Dans le scénario *Sb*, les participants trouvaient l'interface plus utile que dans *Sa*. Nous n'avons pas trouvé d'explication à ce résultat dans la mesure où *Sa* et *Sb* étaient similaires, la différence intervenant uniquement au niveau de l'ordre de succession de ces scènes.

Après avoir conjointement analysé le sentiment d'inconfort et le sentiment de confiance, la satisfaction des participants est étudiée dans la sous-section suivante.

III.2 Satisfaction relative des participants

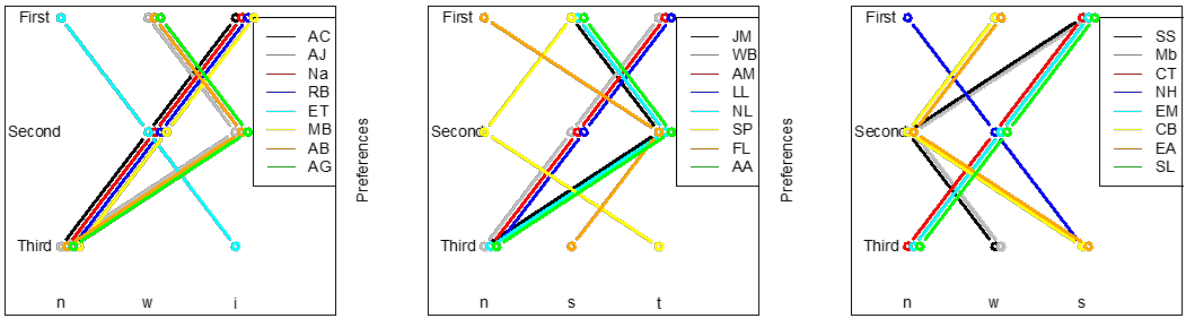
Les participants effectuaient trois roulages durant lesquels étaient affichées trois interfaces différentes. À la fin des trois roulages, la question suivante leur était posée : « Quelles sont par ordre de préférence les interfaces qui vous ont *permis* le mieux de comprendre le système ? En première position, deuxième position…? ». Par exemple, un participant X ayant vu *In, Iw* et *Ii* pouvait choisir de classer *Ii* en 1ère position, *Iw* en 2ème position et *In* en 3ème position. Ceci donnait donc l'opportunité à chaque participant d'exprimer leur préférence relative, qui est corrélée à une satisfaction relative comme nous l'avons présentée dans le chapitre précédent.

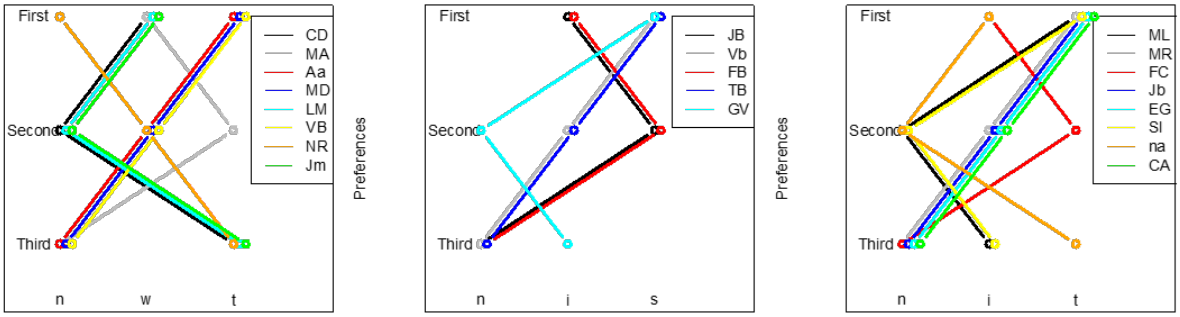
a) Résultats

Les données sont ici différentes des précédentes pour deux raisons :

1. Les valeurs correspondent à des évaluations relatives tandis que les valeurs précédentes correspondent à des valeurs absolues.
2. Les 45 participants n'ont pas tous évalué les mêmes modalités, à l'exception de la modalité *In.*

C'est la raison pour laquelle une procédure spécifique a dû être utilisée. Les 6 graphes de la Figure 79 montrent clairement que la modalité *In* est celle que les participants apprécient le moins comparativement aux quatre autres. Si tous les participants avaient « vu » toutes les interfaces un seul graphe aurait été nécessaire. Cependant, à cause de notre plan d'expérience et du fait que chaque participant voyait uniquement trois interfaces, il est apparu 6 groupes d'individus qui pouvait voir l'une des combinaisons suivantes : *In-In-Ii, In-Is-It, In-Iw-Is, In-Iw-It, In-Ii-Is, In-Ii-It*. Ces combinaisons ont été, bien entendu, contrebalancés comme nous l'avons expliqué dans le chapitre précédent. Cela explique la présence des 6 graphes. Dans chacun de ces graphes, les modalités « First », « Second » et « Third » indique, en ordonnée, le classement des interfaces respectivement en première, deuxième et troisième position ; en abscisse, ce sont les interfaces elles-mêmes qui sont référencées. Dans la légende, sont indiqués, au moyen de codes couleurs, des traits correspondant aux initiales des participants qui ont réalisé la même combinaison d'interfaces.





In: interface qui comprend uniquement les informations de référence

Iw: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information » et « implémentation d'action »

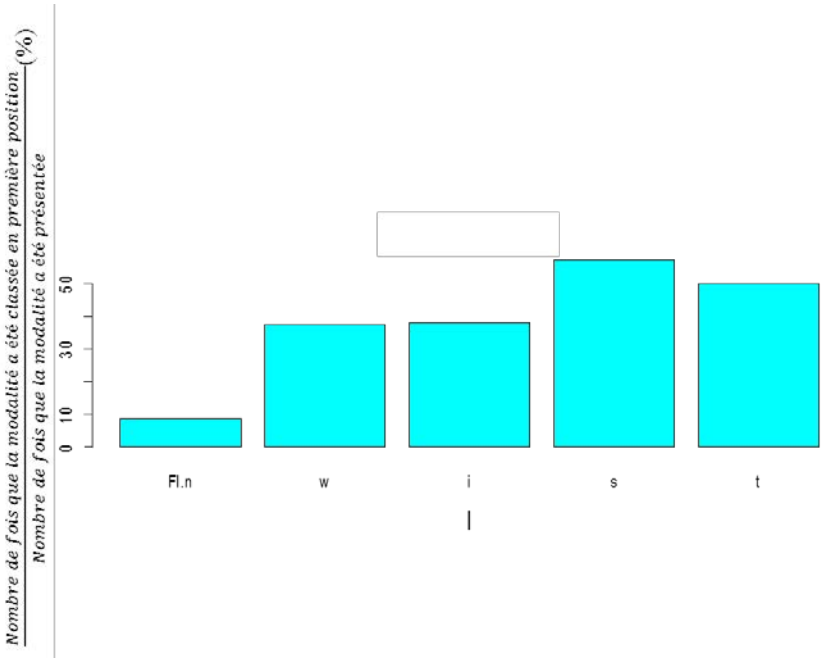
Ii: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse d'information » et « implémentation d'action

Is: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse d'information » et « prise de décision »

It: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse d'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action »

Figure 79 : Classement des modalités de I par chaque participant.

Pour avoir une comparaison plus générale, la Figure 80 montre - pour chaque modalité - le ratio entre le nombre de fois où la modalité a été classée en première position et le nombre total de fois où la modalité a été testée. Par exemple, pour la modalité *In,* ces deux nombres valent respectivement 9 et 45, ce qui donne un ratio de 8,9%.



In: interface qui comprend uniquement les informations de référence

Iw: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information » et « implémentation d'action »

Ii: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse d'information » et « implémentation d'action

Is: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse d'information » et « prise de décision »

It: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse d'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action »

Figure 80 : Classement des modalités en première position

La Figure 80 montre que la modalité *Is* est légèrement plus appréciée que la modalité *It.*

b) Discussion

La préférence des participants porte moins souvent sur *In* que sur les autres, ce qui tend à valider l'hypothèse 5 selon laquelle elle serait la moins appréciée des conducteurs. De plus, *Is*[47] et *It*[48] ont été les plus plébiscitées. D'une part, ce résultat est en accord avec les résultats de SANDERS ET AL. (2014) qui ont montré qu'un haut niveau de transparence est préféré par les individus. De plus, ce résultat corrobore une étude de SINHA ET SWEARINGEN (2002) qui suggère que les personnes préfèrent en général les interfaces perçues comme transparentes. D'autre part, étant donné que *Is* et *It* étaient les seules IHM à afficher les éléments de la fonction « prise de décision » comparativement aux autres modalités, cela laisse penser que cette fonction apporte une plus-value pour la transparence d'une IHM. Les principes T2 et T3 sont validés. Ils stipulent respectivement que ***« Dans le mode autonome établi, le conducteur doit être capable de percevoir l'intention de la voiture autonome (la manœuvre qu'elle va réaliser) et comprendre pourquoi cette manœuvre va être réalisée. »*** et que ***« Dans le mode autonome établi, le conducteur doit être informé de toute manœuvre pouvant en interrompre une autre qui est en cours de réalisation (Changement de plan). »*** L'ensemble des résultats obtenus après l'analyse des données relatives à l'Expérience Utilisateur est résumé dans le Tableau 43.

Tableau 43: Résumé des résultats relatifs à l'Expérience Utilisateur

Rappel de l'identification des IHM
In: interface qui comprend uniquement les informations de référence *Iw*: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information » et « implémentation d'action » *Is*: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse d'information » et « prise de décision » *It*: interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse d'information », « prise de décision » et « implémentation de l'action »
Résultats relatifs au sentiment d'inconfort
1. Il y a significativement plus d'appuis boutons dans *In,* qui ne contenait que les informations de base, que dans *Iw,* mettant en évidence les informations issues de la prise d'information et d'implémentation de l'action.
Résultats relatifs à la compréhension, l'utilité et à la confiance
1. Les participants parviennent significativement mieux à prédire l'action de l'automate avec *Iw* qu'avec *In*. 2. *Iw* facilite significativement plus la compréhension de ce que fait le système que *In*. 3. *Iw* et *It* facilitent significativement plus la compréhension de l'environnement de conduite que *In*. 4. *It,* mettant en évidence les informations issues de la prise d'information, de l'analyse de l'information, de la prise de décision et de l'implémentation de l'action, facilite significativement plus la compréhension de l'environnement de conduite que *In*. 5. *It* paraît significativement plus utile que *In*. 6. Les participants étaient significativement plus confiants avec *It* qu'avec *In.*
Résultats relatifs à la satisfaction des participants
1. *Is*, mettant les informations issues de la prise d'information, de l'analyse de l'information et de la prise de décision, est l'interface la plus appréciée.

[47] Interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse de l'information » et « prise de décision »

[48] Interface qui comprend les informations issues des fonctions « prise d'information », « analyse de l'information » , « prise de décision » et « implémentation »

2. L'interface *It* a été classée en 2ème position parmi les interfaces.

IV. Discussion générale et Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence les principaux résultats issus de l'analyse des variables liées à aux activités cognitives d'une part et à l'expérience utilisateur d'autre part. Malgré le fait qu'il y ait peu de résultats significatifs, les résultats obtenus ont tendance à valider les hypothèses formulées au début du chapitre précédent. En effet, la première analyse a mis en évidence une distinction entre les scènes complexes - comprenant notamment plus de trafic - et celles qui l'étaient moins. L'utilisation d'un oculomètre a permis de mettre en évidence que la scène de changement de voie a généré plus de fixations que celle de la séparation d'autoroute, montrant l'attention des participants pour le trafic environnant. Ce résultat tend à confirmer l'hypothèse 7 que nous avons définie *« selon laquelle la situation à gérer étant simple, ils ont besoin d'un faible nombre d'informations puisque l'automate a un comportement parfaitement prédictible »*. En termes d'analyses oculométriques, les fixations étaient plus nombreuses sur le HUD. Par ailleurs, l'analyse du contenu des interfaces a révélé que les participants avaient tendance à évaluer le comportement de la voiture autonome sur la base d'autres indices que les informations communiquées par l'IHM ; il s'agit, par exemple, du bruit moteur, comme nous l'avions supposé dans l'hypothèse 9. Les résultats ont également permis de mettre en évidence que la transparence de l'interface avait une incidence sur la *Situation Awareness* comme nous l'avons formulé dans l'hypothèse 1, notamment sur la perception. *In*, l'interface de référence, s'est en effet négativement démarquée des autres, générant de mauvaises réponses notamment en ce qui concernait la dynamique d'accélération ou de décélération de la voiture autonome. En considérant l'expérience utilisateur, en particulier le sentiment d'inconfort, *In* s'est également négativement démarquée des autres, parce qu'elle a provoqué le plus de sentiment d'inconfort. De même, après l'analyse des données de questionnaires post-roulage, *In* a été évaluée comme celle qui favorisait le moins la compréhension de l'environnement de conduite et de l'automate. Par ailleurs, *Is*, avec les informations issues de la prise d'informations, de l'analyse de l'information et de la prise de décision, a été la plus appréciée par les participants.

De manière générale, du point de vue activités cognitives, l'interface *Iw*, comprenant les informations liées aux fonctions « Prise d'information » et « Implémentation de l'action » s'est distinguée des autres. Cependant, en considérant l'expérience utilisateur, c'est-à-dire le sentiment d'inconfort et la préférence des participants, *It* qui comprenait les informations liées aux 4 fonctions de PARASURAMAN ET AL. (2000) a supplanté *Iw*. En effet, les participants ont nettement plus apprécié *It* que *Iw.* D'un point de vue expérience utilisateur également*, In,* l'interface de référence a été la moins appréciée conformément à nos attentes dans l'hypothèse 5.

La différence de résultats entre les activités cognitives et l'expérience utilisateur en termes d'effet « Interface » n'est pas une nouveauté. Elle a déjà été abordée par les travaux de NARANJO ET AL. (2010). Nous revenons sur les principes de transparence dans la conclusion de la partie III.

Conclusion de la partie III

Afin de valider les principes de transparence, nous avons présenté dans la troisième partie de ce mémoire, le protocole de l'expérimentation que nous avons réalisée et les résultats de l'analyse des variables qui ont été mesurées. L'expérimentation s'est faite dans un simulateur de conduite statique et repose sur un échantillon de 45 personnes. D'aucuns pourraient se poser la question de la validité écologique d'une telle expérimentation dans un simulateur, un simulateur statique de surcroît. Cette question n'est pas nouvelle et a déjà fait l'objet de nombreuses discussions dans la littérature notamment en ce qui concerne le caractère réaliste de la situation (BEDARD, PARKKARI, WEAVER, RIENDEAU, & DAHLQUIST, 2010). En effet, l'incapacité de certains participants à s'immerger dans le scénario, dans un environnement simulé, soulève certaines interrogations notamment celle du risque perçu des situations de conduite. Notre étude n'y fait pas exception. Dans celle-ci, malgré la recommandation initiale donnée dans la phase de présentation, environ 5% des participants ont clairement exprimé qu'il n'y avait pas de danger, parce que ce qu'ils expérimentaient n'était pas réaliste. Cependant, la proportion de personnes ayant remis en cause le caractère réaliste de la simulation étant faible, la validité écologique de notre simulation ne peut être entièrement remise en cause.

Dans l'expérimentation, les variables mesurées étaient liées aux activités cognitives d'une part et à l'expérience utilisateur d'autre part. Contrairement à nos attentes, il n'y a que peu de résultats significatifs. Cependant, beaucoup de tendances intéressantes, en faveur des principes de transparence, ont pu être relevées, aussi bien en ce qui concerne les activités cognitives que l'expérience utilisateur. En effet, l'analyse des variables liées aux activités cognitives montre tout d'abord l'intérêt des principes portant sur la fonction « implémentation de l'action » notamment le principe T1 selon lequel ***« dans le mode autonome établi, le conducteur doit être informé que l'automate contrôle la voiture en respectant les règles et pratiques de la conduite en vigueur (prédictibilité du comportement de la voiture). Par ailleurs, le conducteur doit être capable de détecter les actions (changement de voie, maintien, changements de vitesse) en cours de réalisation par la voiture et les comprendre. »*** En effet, les informations issues de ce principe en rapport avec la fonction « implémentation de l'action » ont fait l'objet de plusieurs fixations et ont amélioré la *Situation Awareness* des agents. Il s'agit en particulier de la vitesse, et du tableau à 9 cases qui représente la dynamique longitudinale et la dynamique latérale de la voiture autonome. Ce résultat révèle donc que, d'un point de vue cognitif, les agents humains ont besoin de savoir ce que la voiture autonome réalise et ceci tout particulièrement dans les situations complexes comme celle de dépassement avec deux poids lourds. En effet, il semble que dans des situations dangereuses, compte tenu des contraintes temporelles, les agents humains n'ont plus le temps d'analyser toutes les informations affichées par l'automate. Dès lors, les informations liées à l'implémentation de l'action deviennent plus importantes que celles liées à l'analyse de la situation ou de la prise de décision.

En ce qui concerne l'expérience utilisateur, les principaux résultats sont en faveur de l'affichage des informations relatives aux principes en rapport avec la prise d'information, l'analyse de l'information et la prise de décision notamment le principe E1 selon lequel **« *Dans le mode autonome établi, le conducteur doit avoir une perception suffisante de ce que la voiture autonome perçoit pour effectuer ses analyses et prendre ses décisions. Il doit être assuré que la voiture autonome dispose des informations nécessaires à la prise de décision.* »** et le principe T2 selon lequel ***« Dans le mode autonome établi, le conducteur doit être informé de toute manœuvre pouvant en interrompre une autre en cours de réalisation (Changement de plan)* »**. En effet, des informations comme les annotations des bords de voie, de virage, ou de détection des véhicules environnants concernant la prise d'information ont été mentionnées. Par ailleurs, des informations comme la dimension de l'espace d'insertion de la voiture autonome dans la voie adjacente, l'intention de changement de voie de la voiture autonome, et les raisons pour lesquelles un changement de voie est (ou n'est pas) réalisé, ont

également été mentionnées. Les efforts d'affichage des informations en rapport avec les principes issus du modèle analytique, notamment celui le principe A1 selon lequel ***« Tout danger (ou) menace doit être indiqué de façon spécifique »***, ont également été appréciés. Ce résultat montre que la transparence - en termes de prise d'information, d'analyse, et de prise de décision - aide les agents humains à mieux prédire et à comprendre le fonctionnement de la voiture autonome.

Loin de s'opposer, ces deux analyses se complètent. Elles suggèrent qu'il est nécessaire, pour supporter les activités cognitives des conducteurs et générer une expérience utilisateur satisfaisante, d'afficher les informations relevant des quatre fonctions de PARASURAMAN ET AL. (2000). On pourrait cependant, et légitimement, se poser la question de savoir si l'affichage de toutes ces informations n'entraine pas un risque de surcharge informationnelle. C'est la raison pour laquelle nous proposons de distinguer des informations constantes et des informations contextuelles. Les informations relevant de l'implémentation de l'action apparaitraient en permanence. Le conducteur aurait, par ailleurs, la possibilité de configurer l'interface pour obtenir des informations complémentaires. Il est également possible d'adapter ces informations en fonction des situations de conduite. Nous reviendrons sur le caractère adaptatif de l'interface ultérieurement dans la conclusion générale.

Si les tendances principales des résultats ont donné des éléments permettant de valider des principes issus du modèle de l'environnement, du modèle analytique et du modèle de la tâche, il reste à savoir si les principes issus du modèle de coopération et du modèle de l'agent humain ont une plus-value dans la compréhension de ce que fait l'automate par l'agent humain. À cause de limitations matérielles, dues notamment à l'absence d'un driver monitoring, les principes issus du modèle de l'agent humain n'ont pas été évalués. Quant à ceux issus du modèle de la coopération, ils n'ont que très peu été évoqués par les participants. En effet, plusieurs participants ont indiqué ne pas avoir accordé d'attention particulière au mode dans lequel la voiture ne se trouvait ni au temps restant en mode autonome puisque la voiture était toujours en mode autonome. Ces éléments sont apparus lors des entretiens menés avec les participants.

Les résultats ont permis également d'évaluer l'impact des représentations graphiques dans l'appréciation des informations affichées. Les verbatims ont mis en évidence une appréciation positive des annotations en Réalité Augmentée, notamment l'annotation de disponibilité de la voie adjacente pour faire un changement de voie corroborant les résultats de plusieurs travaux de la littérature comme ceux de TONNIS, SANDOR, KLINKER, LANGE ET BUBB (2005). En ce qui concerne les représentations n'ayant pas eu recours à la Réalité Augmentée, le tableau à 9 cases n'a pas été compris par tous les participants. Sur les 10 participants qui l'ont évoqué spontanément, 4 l'ont compris partiellement ou pas du tout. Il en ressort un problème relatif à la formation des agents humains en amont de l'expérimentation. Bien que nous ayons consacré près d'une heure à chaque participant, pour lui faire une présentation générale de l'expérimentation et le former à la reconnaissance des différentes annotations, il y a eu des cas d'oubli. D'emblée, il semble que la durée de formation n'était pas suffisante pour que les annotations soient mémorisées par tous les participants. Il aurait fallu avoir plusieurs heures de roulage, mais compte tenu des contraintes temporelles du projet et de la disponibilité restreinte du simulateur DrSIHMI, cela n'a pas été possible.

En qui concerne les règles d'affichage, notamment concernant l'instant d'affichage des informations, certains participants ont émis le souhait de voir affichées certaines informations beaucoup plus tôt. Ainsi, certains participants ont trouvé que la flèche d'intention de changement de voie s'affichait tardivement. Il faudrait réaliser d'autres expérimentations, plus ciblées, pour identifier le moment idéal pour l'affichage de cette annotation. Si cet affichage est trop précoce, le risque est qu'il soit remis en cause ; dans les situations de trafic dense, il est en

effet fréquent de renoncer à une manœuvre ou de devoir la différer. En ce qui concerne l'annotation de détection des autres véhicules, certains participants ont relevé le fait qu'il y avait un temps de latence entre le moment où un véhicule était visible dans l'environnement et le moment où l'annotation était apposée. Nous avions remarqué ce problème durant les tests préliminaires ; il apparaissait dans quelques situations. Ce délai ne dépendant pas du superviseur IHM (et donc à nos règles), il aurait fallu – pour le limiter – pouvoir réaliser des modifications dans le module « acquisition » des données de l'environnement. Les contraintes temporelles, déjà évoquées, n'ont pas permis de le faire.

En considérant tout ce qui précède, de futures recherches sont nécessaires pour valider, étendre et généraliser les résultats que nous avons obtenus.

Conclusion générale

L'intérêt accordé aux voitures autonomes devient si important que l'institut des ingénieurs en électronique et en électricité (IEEE ou *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) projette qu'en 2040, les autoroutes auront une voie réservée uniquement à la circulation des voitures autonomes, qui constituent une véritable révolution technologique. Cet aménagement spécifique est dû, en partie, à la plus-value attendue de ces voitures, notamment en termes de réduction des accidents routiers. Outre cet aspect économique, les voitures autonomes semblent relever les défis des enjeux sociétaux et environnementaux actuels liés à la mobilité tels que la diminution des temps de trajet et la valorisation du temps passé en voiture en réalisant d'autres activités comme la consultation des emails.

L'engouement pour les voitures autonomes suscite un nombre important de travaux aussi bien dans le milieu industriel que scientifique. Dans le milieu industriel, Renault par exemple, a mis en place dans le cadre de l'IRT System X et avec d'autres collaborateurs comme Valéo, le Commissariat à l'Énergie Atomique, les Universités de Bretagne Sud et de Valenciennes, le projet LRA (Localisation et Réalité Augmentée). C'est dans le cadre de ce projet que cette thèse a été effectuée, nos travaux s'étant focalisés sur la voiture autonome de niveau SAE 4. Dans le mode purement autonome, les compétences de l'automate sont limitées par les conditions environnementales, notamment la détection correcte des lignes blanches. Par conséquent, lorsque les conditions environnementales ne sont plus satisfaisantes, le conducteur doit reprendre le contrôle latéral et longitudinal. Dans un tel contexte, la problématique industrielle de Renault, consiste à déterminer la plus-value de la Réalité Augmentée dans l'interface d'une voiture autonome notamment durant la phase de reprise en main. D'un point de vue scientifique, la problématique est plus large. En effet, il s'agit de concevoir une interface qui favorise non seulement la perception de l'environnement mais aussi la compréhension du comportement de l'automate par l'agent humain. Cette perception et cette compréhension doivent s'établir en amont de la phase de reprise en main, étant donné qu'il faut un certain niveau de confiance pour que le conducteur s'engage sereinement dans une activité autre que celle de la conduite ; sachant que cette autre activité peut engendrer une faible *Situation Awareness* de la situation de conduite. Ainsi, trois questions ont été identifiées pour orienter la conception de l'interface de la voiture autonome dans le but d'alimenter un espace de travail commun entre les deux agents technique et humain. La première concernait le « quoi », c'est à-dire les informations à afficher. La deuxième question, quant à elle, concernait le « comment », c'est-à-dire la manière de représenter ces informations. La troisième question, était en rapport avec le « quand », c'est-à-dire l'instant d'affichage de ces informations.

Avant de répondre à chacune de ces questions, il était important pour nous de poser un ancrage théorique. C'est la raison pour laquelle, dans la première partie du manuscrit, nous avons mis l'accent sur plusieurs notions que sont la Coopération Homme-Machine, la *Situation Awareness*, la Réalité Augmentée et la transparence. Dans cette première partie, il est apparu que l'interface que nous allions concevoir, devait favoriser la *Situation Awareness* de l'agent humain qui coopère avec l'automate ; dans cette optique, la Réalité Augmentée a été identifiée comme un facilitateur. En effet, plusieurs travaux ont relevé que l'ajout d'objets virtuels dans la scène de conduite aide l'agent humain à mieux percevoir les objets réels, à les interpréter et à anticiper les évolutions de leurs états. Ensuite, l'étude de la littérature sur la transparence et sur les modèles existants a conduit à mettre en évidence l'intérêt de rendre la voiture autonome transparente pour qu'elle soit compréhensible d'un point de vue fonctionnel par l'agent humain.

Dans la deuxième partie du mémoire, nous avons tout d'abord retenu le modèle de transparence de Lyons pour l'appliquer à la conduite autonome, notre domaine d'étude. Chaque sous-modèle du modèle de Lyons a été examiné pour établir des principes de transparence,

c'est-à-dire des règles génériques permettant de sélectionner le type d'information à présenter pour rendre le véhicule compréhensible. Cependant, il était important de répondre à la première question, la question du « Quoi ? » de manière concrète. La *Cognitive Work Analysis* (CWA) a donc permis, à partir de l'analyse du domaine de travail et de l'analyse de la tâche de contrôle, tout d'abord d'identifier les informations potentielles à communiquer et ensuite les besoins informationnels de l'agent humain. Nous nous sommes focalisés pour cela sur une situation particulière où la compréhension de l'automate peut être particulièrement difficile pour un conducteur : le changement de voie. Les résultats de la CWA nous ont donc permis de définir des informations tangibles à représenter sur l'IHM. Grâce à plusieurs séances de créativité et afin de répondre à la question du « Comment ? », la forme de ces informations en Réalité Augmentée a pu être ensuite déterminée. Pour répondre à la question du « Quand ? », des règles d'affichage ont alors été définies à l'intérieur d'un superviseur IHM intégré dans le simulateur de conduite statique de l'IRT System X appelé DrSIHMI. Cela permet d'afficher, de façon dynamique, les informations retenues sur les différents afficheurs, notamment l'afficheur tête haute avec Réalité Augmentée. Ainsi, les principes de transparence ont pu être transcrits en termes de contenu et de représentations graphiques.

Pour valider les principes de transparence, une évaluation expérimentale a été réalisée grâce à un échantillon de 45 personnes. Le protocole expérimental et les hypothèses de recherche ont été présentés dans la dernière partie du manuscrit. Afin de pouvoir valider les principes tout en minimisant le nombre de passation, cinq interfaces ont été retenues. Ces interfaces étaient structurées selon les trois niveaux de contrôle de MICHON (1985) et constituées des quatre fonctions du traitement de l'information de PARASURAMAN ET AL. (2000) à partir desquelles les principes ont été classés pour alimenter l'espace de travail commun entre l'automate et l'agent humain. L'évaluation expérimentale a conduit à la mesure de plusieurs variables liées aux activités cognitives de l'agent humain d'une part et à son expérience utilisateur d'autre part.

L'analyse de ces variables a permis de mettre en évidence les principaux résultats suivants :

- Les informations de base constituées par la vitesse de la voiture, l'indication d'angle mort et le GPS sont insuffisantes et ne permettent pas au conducteur d'appréhender correctement le comportement du véhicule.
- L'analyse des variables liées aux activités cognitives de l'agent humain a permis d'identifier que les principes relevant de la prise d'information et de l'action étaient « suffisants » pour améliorer les activités cognitives de l'agent humain.
- L'analyse des variables liées à l'expérience utilisateur a, au contraire, mis en évidence que l'affichage des informations en rapport avec les principes relevant simultanément des quatre fonctions était plus apprécié.
- Trois principes ont pu être validés, sur les 12 que nous avons définis.
- À partir des verbatims extraits des entretiens d'explicitation, la Réalité Augmentée est appréciée pour la représentation des informations.

Nos travaux ont permis d'apporter plusieurs contributions aussi bien théoriques, méthodologiques, qu'industrielles.

D'un point de vue théorique, la principale contribution porte sur la transparence. À notre connaissance, l'étude de SELKOWITZ, LAKHMANI & BOYCE (2015) est la seule à présenter de façon aussi directe le lien entre un modèle de transparence, le modèle SAT (*Situation Awareness based Transparency*) de CHEN ET AL. (2014) que nous avons présenté dans la première partie de ce mémoire, et une application « concrète » de mobilité de robots dans un environnement contrôlé. Cependant, le domaine applicatif n'est pas exactement celui de la conduite automobile. Par

conséquent, une des plus-values de nos travaux est l'apport de connaissances en ce qui concerne la transparence dans le domaine de la conduite automobile avec l'utilisation d'un modèle autre que SAT. Nous sommes allés un peu plus loin dans la transparence en énonçant des principes pour le domaine de la conduite automobile autonome, à partir du modèle de Lyons. Certes, ces principes sont perfectibles mais ils constituent des portes d'entrée pour aider à la conception d'interface pour voitures autonomes. Par ailleurs, nous pensons qu'ils peuvent être adaptés à l'échelle de n'importe quel système d'aide mais également à des domaines autres que la conduite automobile, comme la robotique coopérative (LIU, LIN, & CHANG, 2010 ; GAVA, VASSALLO, ROBERTI, CARELLI, & BASTOS-FILHO, 2007).

Sur un plan méthodologique (Figure 81), il est rare qu'un lien ait été établi entre la transparence et la notion de coopération. Nos travaux ayant été menés dans une optique de coopération agent humain-voiture autonome, nous avons porté une attention particulière à l'établissement d'un référentiel commun entre les deux agents. C'est la raison pour laquelle nous avons transposé le modèle de LYONS (2013), en utilisant les fonctions proposées par PARASURAMAN ET AL. (2000). Plusieurs principes de transparence ont ainsi pu être énoncés pour être mis en lien avec chacune de ces fonctions. Pour avoir des informations concrètes à afficher, nous avons identifié les besoins informationnels de l'agent humain grâce aux deux premières étapes de la *Cognitive Work Analysis*. Ceux-ci ont ensuite été structurés suivant les trois niveaux de contrôle de MICHON (1985) : niveau stratégique, niveau tactique et niveau opérationnel en tenant compte des différents afficheurs disponibles. Après avoir répondu à la question du contenu des informations, des séances de créativité ont été réalisées pour orienter leur présentation en réalité augmentée. Afin d'orienter l'affichage des informations en fonction des afficheurs disponibles et du contexte de conduite, des règles d'affichage - qu'on appelle aussi « règles de supervision » - ont été définies pour le superviseur IHM. Enfin, une validation expérimentale a été conçue pour valider certains principes, le temps disponible étant trop limité pour les valider tous.

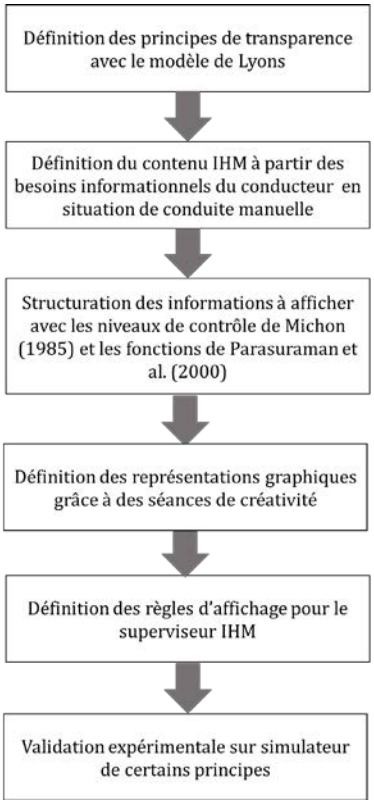


Figure 81 : Approche méthodologique utilisée dans nos travaux

Sur le plan industriel, nos travaux ont apporté quelques éléments de réponse à la problématique relative à la plus-value de la Réalité Augmentée dans le mode autonome. En effet, grâce à la validation expérimentale et aux retours positifs des participants, celle-ci a été identifiée comme une aide à la perception de l'environnement de conduite et à la compréhension du comportement de l'automate, corroborant plusieurs travaux existants. De manière spécifique, d'un point de vue fonctionnel, l'annotation signifiant l'intention de changement de voie et celle en rapport avec la détection des autres véhicules ont été particulièrement appréciées. Sur cette base, ces deux annotations ont d'ailleurs été réutilisées dans le cadre d'un autre projet Renault, le projet Symbioz. Dans celui-ci, le véhicule étudié est également un véhicule autonome de niveau SAE 4 disposant d'un afficheur tête haute avec Réalité Augmentée (Figure 82).

Figure 82 : Prototype Symbioz

Le prototype Symbioz réalise les changements de voie de manière autonome. L'intention de changement de voie a donc été affichée dans le HUD, ainsi que la détection des véhicules comme dans l'une des IHM que nous avons conçues. Les premiers retours des journalistes concernant ce prototype sont plutôt encourageants et soulignent en particulier l'intérêt de communiquer l'intention de changement de voie, qui est encapsulé dans un de nos principes de transparence. Plusieurs documents relatifs à des projets Renault et à Symbioz, en particulier, citent nos travaux de recherche. Il s'agit notamment du position paper de LANGLOIS (2017), un document interne nommé « 20160623_BVC_AFFICHAGE TETE HAUTE_SLANGLOIS » et un article soumis de DREZET ET COLOMBEL (2018). Forts de ces contributions, plusieurs perspectives de recherche s'offrent à nous aussi bien à court terme, à moyen terme qu'à long terme.

Les perspectives à court terme visent à améliorer la validation expérimentale. D'un point de vue conception des interfaces, nous affichions les informations indépendamment du fait qu'elles aient été vues ou pas par l'agent humain. Cependant, il semble inutile d'afficher des informations qui a priori ont déjà été perçues par l'agent humain. Par conséquent, pour adapter l'affichage des informations selon ce que l'agent humain a vu, il serait intéressant d'intégrer un *driver monitoring* qui surveille la position du regard de l'agent humain. Dès lors, la surveillance de son regard permettrait d'adapter l'affichage des informations par rapport à l'agent humain et ainsi éviter toute surcharge informationnelle. Une autre perspective de recherche toujours dans le sens de l'adaptation serait de laisser le choix à l'agent humain de sélectionner une IHM parmi plusieurs, et non de lui en « imposer » une comme nous l'avons fait, à chaque roulage. À un niveau scientifique, cette modification de protocole permettrait d'identifier les informations auxquelles les agents humains ont le plus souvent eu recours en fonction des situations et par déduction d'identifier les principes les plus pertinents. À côté de l'adaptation en fonction de l'agent humain, traiter la question de l'adaptation en fonction de la situation de conduite semble intéressant. En effet, il est également possible de prioriser les informations en fonction du contexte de sorte que dans des situations complexes, des informations jugées secondaires

seraient supprimées, tandis que de plus importantes seraient privilégiées. Par exemple, dans une situation de changement de voie avec un camion, il s'agirait de supprimer l'affichage des bords de voie pour mettre en évidence la présence du camion qui est devant l'égo-véhicule. L'adaptation en fonction de l'agent humain et celle en fonction de la situation de conduite n'ont pas été possibles dans le cadre de nos travaux à cause de l'absence de driver monitoring d'une part, et du temps limité pour apporter des modifications assez lourdes sur le simulateur de conduite d'autre part. D'un point de vue technique, il est absolument nécessaire de trouver le moyen de synchroniser l'oculomètre avec le simulateur de conduite DrSIHMI à l'aide d'un ordinateur de capacité de traitement élevée. Une telle synchronisation entre un oculomètre et un simulateur de conduite a déjà été utilisée par LOSLEVER, SIMON, TODOSKOFF, LEROUX ET ANGUE (1999). Celle-ci permettrait d'avoir des données oculométriques temporelles mieux exploitables qui seraient le reflet du balayage visuel instant après instant de l'agent humain. En identifiant l'objet qui a été perçu par l'agent humain à un instant donné, il serait plus aisé de valider un principe à un instant donné, dans une situation donnée plutôt que d'avoir recours à une analyse des zones d'intérêt qui ne permet pas de faire le lien direct avec les principes.

À moyen terme, d'un point scientifique, il serait intéressant d'intégrer la phase de reprise en main dans la validation expérimentale et intégrer la variable « temps de reprise en main » ou d'autres indicateurs de qualité de conduite proposés par SAID ET CHAUVIN (2017), pour évaluer les différentes interfaces et les principes de transparence. La reprise en main étant anxiogène, intégrer cette phase dans la validation expérimentale permettrait de déterminer si l'une ou l'autre des interfaces favorise la reprise de contrôle du véhicule selon le contexte de conduite. En ce qui concerne le matériel, le HUD dont nous disposions (bien que plus étendu que la plupart des HUD qui équipent les voitures actuelles) nous a limité dans nos possibilités d'affichage, notamment dans la mise en évidence des objets situés en hauteur comme les panneaux de direction. Par conséquent, une autre perspective très intéressante à notre travail de recherche serait de disposer d'un HUD plus grand, lequel permettrait de valider des principes en rapport avec les panneaux de direction par exemple. Dans le même ordre d'idée, il serait intéressant d'afficher des informations situées à l'arrière. Ceci n'a pas été possible dans le cadre du projet LRA à cause du temps de développement long que cela nécessitait. Nous avons essayé de dépasser cette limitation en utilisant des graphiques classiques, c'est-à-dire n'ayant pas recours à la Réalité Augmentée, pour mettre en évidence des événements se déroulant à l'arrière de la voiture. Ces graphiques, ayant été placés à l'avant des participants pour qu'ils les voient, ont constitué un biais dans la perception des participants qui n'ont pas tous compris qu'ils faisaient référence à des évènements arrière. D'un point de vue industriel, Renault a l'ambition de soumettre le prototype de voiture autonome Symbioz à une validation expérimentale. En effet, s'il est vrai que le prototype a trouvé un écho favorable auprès des journalistes, il reste à déterminer quelle est la plus-value de ce prototype dans des conditions de conduite autonome réelle (hors contexte de simulation) auprès d'un plus vaste échantillon de participants.

À long terme, il serait pertinent d'envisager la transparence de la voiture autonome à l'endroit des autres usagers de la route comme les autres conducteurs et même les piétons. En effet, dans nos travaux, nous avons travaillé sur la transparence de la voiture autonome à l'endroit de l'agent humain en position conducteur à l'intérieur de la voiture, indépendamment de la manière dont la voiture autonome serait perçue par les autres usagers. Ainsi, parlant de la transparence de la voiture autonome vis-à-vis des agents humains à l'extérieur, il serait par exemple question de rendre transparent le comportement de la voiture autonome aux autres usagers. Cependant, une précaution à prendre, comme l'ont précisé BENDERIUS, BERGER ET LUNDGREN (2017), serait que l'interface vue par le conducteur de la voiture autonome soit en adéquation avec celle qui est visible par les autres usagers. En effet, il faut que les informations communiquées par l'agent humain à l'intérieur de la voiture soient en accord avec ce que les

autres usagers perçoivent. Par exemple, si l'interface communique à l'agent humain que la voiture autonome a l'intention de faire un changement de voie, l'interface visible par les autres conducteurs doit également montrer que la voiture autonome a l'intention de faire un changement de voie. En outre, jusqu'à présent, la plupart des études portant sur les voitures autonomes ont été réalisées dans des simulateurs ou des environnements protégés où le véhicule n'a que très peu d'interactions avec d'autres véhicules autonomes comme l'ont fait remarquer différents auteurs comme BERTOGNA, BURGIO, CABRI ET CAPODIECI (2017). Les interactions avec les véhicules se limitent généralement à la détection et la reconnaissance de ces véhicules par la voiture autonome, grâce aux caméras et à d'autres capteurs qu'elle possède. Nous avons procédé de la même façon dans nos travaux. Nous pouvons cependant nous demander comment la communication entre véhicules affecterait le contenu des IHM d'une voiture autonome. Plusieurs travaux ont étudié la communication entre véhicules (V2V ou *Vehicle-to-Vehicle*) et la communication entre un véhicule et l'infrastructure (V2I ou *Vehicle-to-Infrastructure*). La prise en compte de ces communications devrait avoir un impact sur les interfaces. Quoiqu'il en soit, l'automatisation des véhicules est une révolution qui affecte et va continuer d'affecter la mobilité, raison pour laquelle elle suscite et continuera de susciter un vif intérêt. Ainsi, notre travail est une petite contribution dans le champ des possibles qu'elle offre.

Bibliographie

Aeberhard, M., Kühbeck, T., Seidl, B., Friedl, M., Thomas, J., & Scheickl, O. (2015). Automated Driving with ROS at BMW. *ROSCon 2015 Hamburg, Germany*.

Allen, R. W., Mitchell, D. G., Stein, A. C., & Hogue, J. R. (1991). *Validation of real-time man-in-the-loop simulation* (No. VTI Rapport 372A, Part 4).

Amalberti, R. (1996). *La conduite de systèmes à risques: le travail à l'hôpital*. Presses universitaires de France.

Annett, J. (2003). Hierarchical task analysis. *Handbook of cognitive task design*, *2*, 17-35.

Artman, H., & Garbis, C. (1998). Team communication and coordination as distributed cognition. In *9th Conference of Cognitive Ergonomics* (pp. 151-156).

Awad, N. F., & Fitzgerald, K. (2005). The deceptive behaviors that offend us most about spyware. *Communications of the ACM*, *48*(8), 55-60.

Azuma, R. T. (1997). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and virtual environments*, *6*(4), 355-385.

Bagheri, N., & Jamieson, G. A. (2004, October). The impact of context-related reliability on automation failure detection and scanning behaviour. In *Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 212-217). IEEE.

Bagnara, S., Rizzo, A., & Failla, A. (1994). Organizational structures and distributed decision making. *Le Travail Humain*, 387-400.

Bailey, N. R., & Scerbo, M. W. (2007). Automation-induced complacency for monitoring highly reliable systems: the role of task complexity, system experience, and operator trust. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *8*(4), 321-348.

Bainbridge, L. (1983). Ironies of automation. *Automatica*, *19*(6), 775-779.

Banks, V. A., Stanton, N. A., & Harvey, C. (2014). Sub-systems on the road to vehicle automation: Hands and feet free but not 'mind'free driving. *Safety science*, *62*, 505-514.

Barber, B. (1983). The logic and limits of trust. New Brunswick: Rutgers University Press.

Bardin, L. (1977). *L'analyse de contenu* (Vol. 69). Paris: Presses universitaires de France.

Barg-Walkow, L. H., & Rogers, W. A. (2016). The effect of incorrect reliability information on expectations, perceptions, and use of automation. *Human factors*, *58*(2), 242-260.

Bawden, D., & Robinson, L. (2009). The dark side of information: overload, anxiety and other paradoxes and pathologies. *Journal of information science*, *35*(2), 180-191.

Bradshaw, J. M., Feltovich, P. J., Jung, H., Kulkarni, S., Taysom, W., & Uszok, A. (2003, July). Dimensions of adjustable autonomy and mixed-initiative interaction. In *International Workshop on Computational Autonomy* (pp. 17-39). Springer, Berlin, Heidelberg.

Bédard, M., Parkkari, M., Weaver, B., Riendeau, J., & Dahlquist, M. (2010). Assessment of driving performance using a simulator protocol: Validity and reproducibility. *American Journal of Occupational Therapy*, *64*(2), 336-340.

Bedny, G., & Meister, D. (1999). Theory of activity and situation awareness. *International Journal of cognitive ergonomics*, *3*(1), 63-72.

Beiker, S. and Calo, R. (2010). Legal Aspects of Autonomous Driving. (Workshop summary essay). Available at: http://me.stanford.edu/groups/design/automotive/ADP/

Belderbos, C. A. G. (2015). Authority transition interface: A human machine interface for taking over control from a highly automated truck.

Beller, J., Heesen, M., & Vollrath, M. (2013). Improving the driver–automation interaction: An approach using automation uncertainty. *Human factors*, *55*(6), 1130-1141.

Bellet, T. (1998). *Modélisation et simulation cognitive de l'opérateur humain: une application à la conduite automobile* (Doctoral dissertation, Paris 5).

Bellet, T., Bailly-Asuni, B., Boy, G., Boverie, S., & Hoc, J. M. (2006). Conscience de la situation: regards croisés Aéronautique-Automobile. In *Journées internationales d'études" vers des Ingénieries et des Technologies Communes aux Transports"*.

Bellet, T., Bailly-Asuni, B., Mayenobe, P., & Banet, A. (2009). A theoretical and methodological framework for studying and modelling drivers' mental representations. *Safety Science*, *47*(9), 1205-1221.

Bellet, T., Bornard, J. C., Mayenobe, P., Paris, J. C., Gruyer, D., & Claverie, B. (2012, April). COMPUTATIONAL SIMULATION OF VISUAL DISTRACTION EFFECTS ON CAR DRIVERS'SITUATION AWARENESS. In *ICCM 2012*.

Bellet, T., Bornard, J. C., Mayenobe, P., & Saint Pierre, G. (2011, June). A computational model for car drivers Situation Awareness simulation: COSMODRIVE. In *DHM 2011 First International Symposium on Digital Human Modeling* (p. 8p).

Bellet, T., Mayenobe, P., Bornard, J. C., Gruyer, D., & Mathern, B. (2010). COSMO-SIVIC: a first step towards a virtual platform for Human Centred Design of driving assistances. *IFAC Proceedings Volumes*, *43*(13), 210-215.

Bellet, T., Mayenobe, P., Bornard, J. C., Paris, J. C., Gruyer, D., & Claverie, B. (2011). Human driver modelling and simulation into a virtual road environment. In *Human modelling in assisted transportation* (pp. 251-262). Springer, Milano.

Bellet, T., & Tattegrain-Veste, H. (1999). A framework for representing driving knowledge. *International journal of cognitive ergonomics*, *3*(1), 37-49.

Bellet, T., & Tattegrain-Veste, H. (2003). 3. Cosmodrive: un modèle de simulation cognitive du conducteur automobile. In *Formalismes de modélisation pour l'analyse du travail et l'ergonomie* (pp. 77-110). Presses Universitaires de France.

Bennett, K. B., & Flach, J. M. (2011). Display and interface design. *Subtle Science and Exact Art*.

Benzecri, F. (1980). Introduction à l'analyse des correspondances d'après un exemple de données médicales. *Les cahiers de l'analyse des données*, *5*(3), 283-310.

Benzécri, J. P. (1992). *Correspondence analysis handbook*. Marcel Dekker.

Bidulka, S., Sayed, T., & Hassan, Y. (2002). Influence of vertical alignment on horizontal curve perception: Phase I: Examining the hypothesis. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1796), 12-23.

Bila-Deroussy, P., Bouchard, C., & Kaba, S. D. (2015). A systemic model of creativity to address complexity in design: the state of the art and perspectives. In *DS79: Proceedings of The Third International Conference on Design Creativity, Indian Institute of Science, Bangalore*.

Billings, C. E. (1996). Human-centered aviation automation: Principles and guidelines.

Billot-Grasset, A., Amoros, E., & Hours, M. (2016). How cyclist behavior affects bicycle accident configurations?. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, *41*, 261-276.

Biocca, F. A., & Rolland, J. P. (1998). Virtual eyes can rearrange your body: Adaptation to visual displacement in see-through, head-mounted displays. *Presence*, *7*(3), 262-277.

Birrell, S. A., Young, M. S., Jenkins, D. P., & Stanton, N. A. (2012). Cognitive Work Analysis for safe and efficient driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *13*(4), 430-449.

Bisantz, A. M., Roth, E., Brickman, B., Gosbee, L. L., Hettinger, L., & McKinney, J. (2003). Integrating cognitive analyses in a large-scale system design process. *International Journal of Human-Computer Studies*, *58*(2), 177-206.

Bisantz, A. M., & Seong, Y. (2001). Assessment of operator trust in and utilization of automated decision-aids under different framing conditions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *28*(2), 85-97.

Blandford, A., & Wong, B. W. (2004). Situation awareness in emergency medical dispatch. *International journal of human-computer studies*, *61*(4), 421-452.

Bleakley, A., Allard, J., & Hobbs, A. (2013). 'Achieving ensemble': communication in orthopaedic surgical teams and the development of situation awareness—an observational study using live videotaped examples. *Advances in Health Sciences Education*, *18*(1), 33-56.

Bolstad, C. A. (2001). *Age-related factors affecting the perception of essential information during complex driving situations* (No. AAT 3005361 (UMI order#)).

Bornard, J. C., Bellet, T., Mayenobe, P., Gruyer, D., & Claverie, B. (2011, June). A perception module for car drivers visual strategies modeling and visual distraction effect simulation. In *Proceedings of the 1st international Symposium on Digital Human Modelling (IEA-DHM)* (pp. 1-6).

Boy, G. A. (2009). The Orchestra: A Conceptual Model for Function Allocation and Scenario based Engineering in Multi-Agent Safety-Critical Systems. In *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics, Finland* (pp. 187-193).

Bredereke, J., & Lankenau, A. (2002, September). A rigorous view of mode confusion. In *International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security* (pp. 19-31). Springer, Berlin, Heidelberg.

Brush, A. J., Lee, B., Mahajan, R., Agarwal, S., Saroiu, S., & Dixon, C. (2011, May). Home automation in the wild: challenges and opportunities. In *proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2115-2124). ACM.

Butler, R., Miller, S., & Potts, J. (1998). Carreño. A formal method approach to the analysis of mode confusion. In proceedings of 17th AIAA. In *IEEE Digital Avionics Systems Conference*.

Byrne, E. A., & Parasuraman, R. (1996). Psychophysiology and adaptive automation. *Biological psychology*, *42*(3), 249-268.

Cahour, B., & Falzon, P. (1991). Assistance à l'opérateur et modélisation de sa compétence. *Intellectica*, *2*(12), 159-186.

Cahour, B., & Forzy, J. F. (2009). Does projection into use improve trust and exploration? An example with a cruise control system. *Safety science*, *47*(9), 1260-1270.

Cahour, B., Salembier, P., & Zouinar, M. (2016). Analyzing lived experience of activity. *Le travail humain*, *79*(3), 259-284.

Caradvice, What is a heads-up display? HUD in the 2015 Mercedes-Benz C-Class C250 © CarAdvice.com Limited | ABN: 84 116 608 158 [consulté le 29 mai 2018].

https://www.caradvice.com.au/videos/what-is-a-heads-up-display-hud-in-the-2015-mercedes-benz-c-class-c250/

Carmody, M. A., & Gluckman, J. P. (1993, May). Task specific effects of automation and automation failure on performance, workload and situational awareness. In *Proceedings of the Seventh International Symposium on Aviation Psychology* (Vol. 1, pp. 167-171). Columbus, OH: Department of Aviation, The Ohio State University.

Carrier C. (1997), De la créativité à l'intrapreneuriat, Presse de l'Université du Quebec, Quebec.

Carsten, O., Lai, F. C., Barnard, Y., Jamson, A. H., & Merat, N. (2012). Control task substitution in semiautomated driving: Does it matter what aspects are automated?. *Human factors*, *54*(5), 747-761.

Castelfranchi, C. (1998). Modelling social action for AI agents. *Artificial Intelligence*, *103*(1-2), 157-182.

Cestac, J., Paran, F., & Delhomme, P. (2014). Drive as I say, not as I drive: Influence of injunctive and descriptive norms on speeding intentions among young drivers. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, *23*, 44-56.

Chaplier, J., That, T. N., Hewatt, M., & Gallée, G. (2010). Toward a standard: RoadXML, the road network database format. *Actes INRETS*, 211-220.

Chauvin, C. (2008). Le facteur humain et la sécurité maritime. In *La Revue Maritime n° 489*.

Chauvin, C., Clostermann, J. P., & Hoc, J. M. (2008). Situation awareness and the decision-making process in a dynamic situation: avoiding collisions at sea. *Journal of cognitive engineering and decision making*, *2*(1), 1-23.

Chauvin, C., Lardjane, S., Morel, G., Clostermann, J. P., & Langard, B. (2013). Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS. *Accident Analysis & Prevention*, *59*, 26-37.

Chen, J. Y., Procci, K., Boyce, M., Wright, J., Garcia, A., & Barnes, M. (2014). *Situation awareness-based agent transparency* (No. ARL-TR-6905). ARMY RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MD HUMAN RESEARCH AND ENGINEERING DIRECTORATE.

Chiappe, D. L., Strybel, T. Z., & Vu, K. P. L. (2012). Mechanisms for the acquisition of situation awareness in situated agents. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *13*(6), 625-647.

Choi, J. K., & Ji, Y. G. (2015). Investigating the importance of trust on adopting an autonomous vehicle. *International Journal of Human-Computer Interaction*, *31*(10), 692-702.

Cohen, P., Cheyer, A., Wang, M., and Baeg, S. (1998) An Open Agent Architecture. In: M.N. Huhns and M.P. Singh (eds.), Readings in Agents, San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 197–204.

Continental, HUD-Continental, Continental Head-up Display Augmented Reality HUD © 2014 Continental Automotive GmbH - Legal / Imprint [consulté le 15 mai 2018]. http://continental-head-up-display.com/

Cook, C., Corbridge, C., Morgan, C., & Turpin, E. (1999). Investigating methods of dynamic function allocation for naval command and control.

Craft, B., & Cairns, P. (2009, September). Sketching sketching: outlines of a collaborative design method. In *Proceedings of the 23rd British HCI Group Annual Conference on People and Computers: Celebrating People and Technology* (pp. 65-72). British Computer Society.

Cranor, L. F. (2008). A framework for reasoning about the human in the loop. *UPSEC*, *8*(2008), 1-15.

Créno, L., & Cahour, B. (2015). Triangulation des méthodes pour une analyse de l'activité selon différents points de vue: exemple de la gestion des emails chez des cadres surchargés. *Psychologie Française*, *60*(2), 129-144.

Crevits, I. (1996). *Répartition dynamique de tâches dans les procédés complexes. Modélisation de la répartition anticipée: application au contrôle de trafic aérien* (Doctoral dissertation, Valenciennes).

Cring, E. A., & Lenfestey, A. G. (2009). *Architecting human operator trust in automation to improve system effectiveness in multiple unmanned aerial vehicles (UAV) control* (No. AFIT/GSE/ENV/09-M06). AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSON AFB OH GRADUATE SCHOOL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT.

Croyle, R. T., & Cooper, J. (1983). Dissonance arousal: Physiological evidence. *Journal of personality and social psychology*, *45*(4), 782.

Darses, F., Rix-Lièvre, G., & Chauvin, C. (2016). de haut niveau Présentée par Anne-Claire MACQUET.

Debernard, S. (1993). *Contribution à la répartition dynamique de tâches entre opérateur et système automatisé: application au contrôle du trafic aérien* (Doctoral dissertation, Valenciennes).

Debernard, S. (2006). Coopération homme-machine et répartition dynamique des tâches-Application au contrôle de trafic aérien. *Habilitation à diriger des recherches*, *6*(03).

Debernard, S., Annebicque D., Crévits I., Poulain T. (2008). Vers une modélisation des systèmes coopératifs. *Actes de la Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA 2008*, Bucarest, Roumanie, septembre, ISBN 978-2-915913-24-8.

Debernard, S., Cathelain, S., Crévits, I., & Poulain, T. (2002). AMANDA Project: Delegation of tasks in the air-traffic control domain. *COOP 2002: Cooperative Systems Design-A Challenge of the Mobility Age*.

Debernard, S., Chauvin, C., Pokam, R., & Langlois, S. (2016). Designing human-machine interface for autonomous vehicles. In *IFAC 16: 13th IFAC Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems HMS 2016*: Kyoto, Japan, 30 August—2 September 2016 *IFAC-PapersOnLine*, *49*(19), 609-614.

Debernard, S., Crévits, I., Carlier, X., Denecker, P., & Hoc, J. M. (1998). Projet AMANDA. Rapport Final de la première phase. Rapport CENA/NR98-185 de la convention de recherche LAMIH/CENA/96.

Debernard, S., Guiost, B., Poulain, T., Crévits, I., Annebicque, D., & Millot, P. (2009). Integrating human factors in the design of intelligent systems: an example in air traffic control. *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*, *7*(2), 205-226.

Debernard, S., & Hoc, J. M. (2003). Conception de la répartition dynamique d'activités entre opérateur humain et machine. Leçons tirées d'une collaboration pluridisciplinaire dans le contrôle de trafic aérien. *Journal européen des systèmes automatisés*, *37*, 187-211.

Debernard, S., Riera, B., & Poulain, T. (2014). The Common Work Space for the Support of Supervision and Human–Machine Cooperation. *Designing Human-Machine Cooperation Systems*, 285-341.

Debernard, S., Vanderhaegen, F., & Millot, P. (1993). An experimental investigation of dynamic allocation of tasks between air traffic controller and AI systems. In *Analysis, Design and Evaluation of Man–Machine Systems 1992* (pp. 95-100).

Degani, A., & Heymann, M. (2002). Formal verification of human-automation interaction. *Human factors*, *44*(1), 28-43.

Dekker, S., & Lützhöft, M. (2004). Correspondence, cognition and sensemaking: a radical empiricist approach to situation awareness.

Deniaud, C., Mestre, D., Honnet, V., & Jeanne, B. (2014, September). The concept of presence used as a measure for ecological validity in driving simulators. In *Proceedings of the 2014 European Conference on Cognitive Ergonomics* (p. 7). ACM.

Deniaud, C., Honnet, V., Jeanne, B., & Mestre, D. (2015). The concept of "presence" as a measure of ecological validity in driving simulators. *Journal of Interaction Science*, *3*(1), 1.

Desmond, P., Hancock, P., & Monette, J. (1998). Fatigue and automation-induced impairments in simulated driving performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1628), 8-14.

De Terssac, G., & Chabaud, C. (1990). Référentiel opératif commun et fiabilité. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*, 111-139.

Deutsch, M. (1958). Trust and suspicion. *Journal of conflict resolution*, *2*(4), 265-279.

Deutsch, M. (1960). Trust, trustworthiness, and the F Scale. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, *61*(1), 138.

de Winter, J. C., & Dodou, D. (2014). Why the Fitts list has persisted throughout the history of function allocation. *Cognition, Technology & Work*, *16*(1), 1-11.

Dingus, T. A., Klauer, S. G., Neale, V. L., Petersen, A., Lee, S. E., Sudweeks, J. D., ... & Bucher, C. (2006). *The 100-car naturalistic driving study, Phase II-results of the 100-car field experiment* (No. HS-810 593).

Dogan, E., Deborne, R., Delhomme, P., Kemeny, A., & Jonville, P. (2014). *Evaluating the shift of control between driver and vehicle at high automation at low speed: The role of anticipation.* Paper presented at the Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment.

Duchowski, A. T. (2007). Eye tracking methodology. *Theory and practice*, *328*.

Dzindolet, M. T., Peterson, S. A., Pomranky, R. A., Pierce, L. G., & Beck, H. P. (2003). The role of trust in automation reliance. *International Journal of Human-Computer Studies*, *58*(6), 697-718.

Endsley, M. R. (1987, September). The application of human factors to the development of expert systems for advanced cockpits. In *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting* (Vol. 31, No. 12, pp. 1388-1392). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Endsley, M. R. (1988, October). Design and evaluation for situation awareness enhancement. In *Proceedings of the Human Factors Society annual meeting* (Vol. 32, No. 2, pp. 97-101). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Endsley, M. R. (1993). A survey of situation awareness requirements in air-to-air combat fighters. *The International Journal of Aviation Psychology*, *3*(2), 157-168.

Endsley, M. R. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human factors*, *37*(1), 32-64.

Endsley, M. R. (2015). Situation awareness misconceptions and misunderstandings. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *9*(1), 4-32.

Endsley, M. R. (2016). *Designing for situation awareness: An approach to user-centered design*. CRC press.

Endsley, M. R., & Garland, D. J. (Eds.). (2000). *Situation awareness analysis and measurement*. CRC Press.

Endsley, M. R., & Kiris, E. O. (1995). The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation. *Human factors*, *37*(2), 381-394.

Engström, J., Johansson, E., & Östlund, J. (2005). Effects of visual and cognitive load in real and simulated motorway driving. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *8*(2), 97-120.

Eriksson, A., & Stanton, N. A. (2015). When communication breaks down or what was that?–The importance of communication for successful coordination in complex systems. *Procedia Manufacturing*, *3*, 2418-2425.

Eriksson, A., & Stanton, N. A. (2016, April). The chatty co-driver: A linguistics approach to human-automation-interaction. In *Contemporary ergonomics and human factors 2016: Proceedings of the international conference on ergonomics & human factors*.

Eriksson, A., Petermeijer, S. M., Zimmerman, M., De Winter, J. C. F., Bengler, K. J., & Stanton, N. A. (2017). Rolling out the red (and green) carpet: supporting driver decision making in automation-to-manual transitions. *IEEE Transactions on Human Machine Systems subj. corrections*.

Eriksson, A., & Stanton, N. A. (2017). Takeover time in highly automated vehicles: noncritical transitions to and from manual control. *Human factors*, *59*(4), 689-705.

Fioratou, E., Flin, R., Glavin, R., & Patey, R. (2010). Beyond monitoring: distributed situation awareness in anaesthesia. *British journal of anaesthesia*, *105*(1), 83-90.

Fitts, P. M. (1951). Human engineering for an effective air-navigation and traffic-control system.

Fracker, M. L. (1988, October). A theory of situation assessment: Implications for measuring situation awareness. In *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting* (Vol. 32, No. 2, pp. 102-106). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Fuld, R. B. (2000). The fiction of function allocation, revisited. *International Journal of Human-Computer Studies*, *52*(2), 217-233.

Fujihara, Y., Oikawa, H., & Murayama, Y. (2008, July). Towards an interface causing discomfort for security: A user survey on the factors of discomfort. In *Secure System Integration and Reliability Improvement, 2008. SSIRI'08. Second International Conference on* (pp. 173-174). IEEE.

Furukawa, H., Inagaki, T., Shiraishi, Y., & Watanabe, T. (2003, October). Mode awareness of a dual-mode adaptive cruise control system. In *Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on* (Vol. 1, pp. 832-837). IEEE.

Gasser, T. M., & Westhoff, D. (2012, July). BASt-study: Definitions of automation and legal issues in Germany. In *Proceedings of the 2012 Road Vehicle Automation Workshop*.

Gava, C. C., Vassallo, R. F., Roberti, F., Carelli, R., & Bastos-Filho, T. F. (2007, April). Nonlinear control techniques and omnidirectional vision for team formation on cooperative

robotics. In *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on* (pp. 2409-2414). IEEE.

Geels-Blair, K., Rice, S., & Schwark, J. (2013). Using system-wide trust theory to reveal the contagion effects of automation false alarms and misses on compliance and reliance in a simulated aviation task. *The International Journal of Aviation Psychology*, *23*(3), 245-266.

George, P., Thouvenin, I., Fremont, V., & Cherfaoui, V. (2012, June). DAARIA: Driver assistance by augmented reality for intelligent automobile. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE* (pp. 1043-1048). IEEE.

Gibson, J. I. (1979). The ecological approach to visual perception. Boston: HouglHon Mifflin.

Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L., & Bengler, K. (2013, September). "Take over!" How long does it take to get the driver back into the loop?. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 57, No. 1, pp. 1938-1942). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Gold, C., Körber, M., Hohenberger, C., Lechner, D., & Bengler, K. (2015). Trust in automation–Before and after the experience of take-over scenarios in a highly automated vehicle. *Procedia Manufacturing*, *3*, 3025-3032.

Gold, C., Körber, M., Lechner, D., & Bengler, K. (2016). Taking over control from highly automated vehicles in complex traffic situations: the role of traffic density. *Human factors*, *58*(4), 642-652.

Gold, C., Lorenz, L., & Bengler, K. (2014). Influence of automated brake application on take-over situations in highly automated driving scenarios. In *Proceedings of the FISITA 2014 World Automotive Congress*.

Grafsgaard, J. F., Fulton, R. M., Boyer, K. E., Wiebe, E. N., & Lester, J. C. (2012, October). Multimodal analysis of the implicit affective channel in computer-mediated textual communication. In *Proceedings of the 14th ACM international conference on Multimodal interaction* (pp. 145-152). ACM.

Green, T. R., Petre, M., & Bellamy, R. K. E. (1991). Comprehensibility of visual and textual programs: A test of superlativism against the'match-mismatch'conjecture. *ESP*, *91*(743), 121-146.

Grice, H. P. (1975). Logic and conversation. *1975*, 41-58.

Griffiths, P. G., & Gillespie, R. B. (2005). Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits. *Human factors*, *47*(3), 574-590.

Gugerty, L. J. (1997). Situation awareness during driving: Explicit and implicit knowledge in dynamic spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *3*(1), 42.

Guilbert, L., & Lancry, A. (2007). L'analyse des activités des cadres: l'intérêt de la triangulation des méthodes. *Le travail humain*, *70*(4), 313-342.

Guo, C. (2017). *Conception des principes de coopération conducteur-véhicule pour les systèmes de conduite automatisée* (Doctoral dissertation, Valenciennes).

Guo, H., Zhao, F., Wang, W., & Jiang, X. (2014). Analyzing Drivers' Attitude towards HuD system using a stated Preference survey. *Advances in Mechanical Engineering*, *6*, 380647.

Hajdukiewicz, J., & Burns, C. (2004, September). Strategies for bridging the gap between analysis and design for ecological interface design. In *Proceedings of the Human Factors and*

Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 48, No. 3, pp. 479-483). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Hancock, P. A., Billings, D. R., Schaefer, K. E., Chen, J. Y., De Visser, E. J., & Parasuraman, R. (2011). A meta-analysis of factors affecting trust in human-robot interaction. *Human Factors*, *53*(5), 517-527.

Hartson, H. R., & Gray, P. D. (1992). Temporal aspects of tasks in the user action notation. *Human-Computer Interaction*, *7*(1), 1-45.

Hartwich, F., Beggiato, M., & Krems, J. F. (2018). Driving comfort, enjoyment and acceptance of automated driving–effects of drivers' age and driving style familiarity. *Ergonomics*, 1-16.

Hauer, E. (1988) The safety of older persons at intersections. Transportation in an aging society. Washington, DC, Transportation Research Board.

Hauss, Y., & Eyferth, K. (2003). Securing future ATM-concepts' safety by measuring situation awareness in ATC. *Aerospace science and technology*, *7*(6), 417-427.

Heider, F. (1946). Attitudes and cognitive organization. *The Journal of psychology*, *21*(1), 107-112.

Helldin, T., Falkman, G., Riveiro, M., & Davidsson, S. (2013, October). Presenting system uncertainty in automotive UIs for supporting trust calibration in autonomous driving. In *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications* (pp. 210-217). ACM.

Heymann, M., & Degani, A. (2007). Formal analysis and automatic generation of user interfaces: Approach, methodology, and an algorithm. *Human Factors*, *49*(2), 311-330.

Hilburn, B., Jorna, P. G., Byrne, E. A., & Parasuraman, R. (1997). The effect of adaptive air traffic control (ATC) decision aiding on controller mental workload. *Human-automation interaction: Research and practice*, 84-91.

Hilburn, B., Molloy, R., Wong, D., & Parasuraman, R. (1993). Operator versus computer control of adaptive automation. *The adaptive function allocation for intelligent cockpits (AFAIC) program: Interim research and guidelines for the application of adaptive automation*, 31-36.

Hildebrandt, M., & Harrison, M. (2003, October). Putting time (back) into dynamic function allocation. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 47, No. 3, pp. 488-492). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Ho, C., Tan, H. Z., & Spence, C. (2005). Using spatial vibrotactile cues to direct visual attention in driving scenes. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *8*(6), 397-412.

Hoc, J. M. (1988). *Cognitive psychology of planning*. Academic Press Professional, Inc..

Hoc, J. M. (1996). *Supervision et contrôle de processus: la cognition en situation dynamique*. Presses universitaires de Grenoble.

Hoc, J. M. (2000). From human–machine interaction to human–machine cooperation. *Ergonomics*, *43*(7), 833-843.

Hoc, J. M. (2001). Towards a cognitive approach to human–machine cooperation in dynamic situations. *International journal of human-computer studies*, *54*(4), 509-540.

Hoc, J. M. (2004). 16. Vers une coopération homme-machine en situation dynamique. In *Ergonomie* (pp. 269-283). Presses Universitaires de France.

Hoc, J. M. (2007). Human and automation: a matter of cooperation. In *HUMAN 07* (pp. 277-285). Université de Metz.

Hoc, J. M., & Amalberti, R. E. N. E. (1995). Diagnosis: some theoretical questions raised by applied research. *Current psychology of cognition*, *14*(1), 73-101.

Hoc, J. M., & Blosseville, J. M. (2003). Cooperation between drivers and in-car automatic driving assistance. In *Proceedings of CSAPC* (Vol. 3, pp. 17-22).

Hoc, J. M., & Debernard, S. (2002). Respective demands of task and function allocation on human-machine co-operation design: a psychological approach. *Connection science*, *14*(4), 283-295.

Hoc, J. M., & Lemoine, M. P. (1998). Cognitive evaluation of human-human and human-machine cooperation modes in air traffic control. *The International Journal of Aviation Psychology*, *8*(1), 1-32.

Hoc, J. M., & Leplat, J. (1983). Evaluation of different modalities of verbalization in a sorting task. *International Journal of Man-Machine Studies*, *18*(3), 283-306.

Hoc, J. M., Young, M. S., & Blosseville, J. M. (2009). Cooperation between drivers and automation: implications for safety. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *10*(2), 135-160.

Hoff, K. A., & Bashir, M. (2015). Trust in automation: Integrating empirical evidence on factors that influence trust. *Human Factors*, *57*(3), 407-434.

Hogg, D. N., FOLLES∅, K. N. U. T., Strand-Volden, F., & Torralba, B. (1995). Development of a situation awareness measure to evaluate advanced alarm systems in nuclear power plant control rooms. *Ergonomics*, *38*(11), 2394-2413.

Holland, C. A. (2001). Older drivers: a review. *ROAD SAFETY RESEARCH REPORT NO 25*.

Hollnagel, E. (Ed.). (2003). *Handbook of cognitive task design*. CRC Press.

Hollnagel, E., & Woods, D. D. (1983). Cognitive systems engineering: New wine in new bottles. *International Journal of Man-Machine Studies*, *18*(6), 583-600.

Hollnagel, E., & Woods, D. D. (2005). *Joint cognitive systems: Foundations of cognitive systems engineering*. CRC Press.

Horrey, W., & Wickens, C. (2007). In-vehicle glance duration: distributions, tails, and model of crash risk. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2018), 22-28.

Ichiki, M., Ai, G., Ooi, J. S., & Wagatsuma, H. (2016). A Comparative Analysis of Indexing of Mental Workload by using Neuro-Driving Tools based on EEG Measurements Coupling with the Eye-Tracking System. In *Front. Neuroinform. Conference Abstract: Neuroinformatics*.

Inagaki, T. (2010). Traffic systems as joint cognitive systems: issues to be solved for realizing human-technology coagency. *Cognition, Technology & Work*, *12*(2), 153-162.

Jackson, L., Chapman, P., & Crundall, D. (2009). What happens next? Predicting other road users' behaviour as a function of driving experience and processing time. *Ergonomics*, *52*(2), 154-164.

Jamieson, G. A., Miller, C. A., Ho, W. H., & Vicente, K. J. (2007). Integrating task-and work domain-based work analyses in ecological interface design: A process control case study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, *37*(6), 887-905.

Jamieson, G. A., & Vicente, K. J. (2005). Designing effective human-automation-plant interfaces: A control-theoretic perspective. *Human Factors*, *47*(1), 12-34.

Jeannot, E., Kelly, C., & Thompson, D. (2003). The development of situational awareness in ATM systems.

Jenkins, D. P., Stanton, N. A., Walker, G. H., Salmon, P. M., & Young, M. S. (2008). Applying cognitive work analysis to the design of rapidly reconfigurable interfaces in complex networks. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *9*(4), 273-295.

Johns, J. L. (1996). A concept analysis of trust. *Journal of Advanced Nursing*, *24*(1), 76-83.

Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2007). Applied multivariate correspondence analysis.

Jonas, K., Diehl, M., & Brömer, P. (1997). Effects of attitudinal ambivalence on information processing and attitude-intention consistency. *Journal of Experimental Social Psychology*, *33*(2), 190-210.

Jones, D. G. (2015). A practical perspective on the utility of situation awareness. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *9*(1), 98-100.

Jones, D. G., & Endsley, M. R. (1996). Sources of situation awareness errors in aviation. *Aviation, space, and environmental medicine*.

Jordan, N. (1963). Allocation of functions between man and machines in automated systems. *Journal of applied psychology*, *47*(3), 161.

Joshi, A., Miller, S. P., & Heimdahl, M. P. (2003, October). Mode confusion analysis of a flight guidance system using formal methods. In *Digital Avionics Systems Conference, 2003. DASC'03. The 22nd* (Vol. 1, pp. 2-D). IEEE.

Judas, S. (2015). *Allocation des fonctions entre l'homme et la machine dans les sytèmes sociotechniques complexes. Application au pilotage de sous-marins* (Doctoral dissertation, Lorient).

Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (1997). Out-of-the-loop performance problems and the use of intermediate levels of automation for improved control system functioning and safety. *Process Safety Progress*, *16*(3), 126-131.

Kaber, D. B., & Endsley, M. R. (2004). The effects of level of automation and adaptive automation on human performance, situation awareness and workload in a dynamic control task. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *5*(2), 113-153.

Kaber, D. B., Omal, E., & Endsley, M. (1999). Level of automation effects on telerobot performance and human operator situation awareness and subjective workload. *Automation technology and human performance: Current research and trends*, 165-170.

Kaber, D. B., Riley, J. M., Tan, K. W., & Endsley, M. R. (2001). On the design of adaptive automation for complex systems. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, *5*(1), 37-57

Karsenty, L. (2000). Cooperative work: the role of explanation in creating a shared problem representation. *Le travail humain*, 289-309.

Karsenty, L., & Botherel, V. (2005). Transparency strategies to help users handle system errors. *Speech Communication*, *45*(3), 305-324.

Kasneci, E., Kasneci, G., Kübler, T. C., & Rosenstiel, W. (2015). Online recognition of fixations, saccades, and smooth pursuits for automated analysis of traffic hazard perception. In *Artificial neural networks* (pp. 411-434). Springer, Cham.

Khan, A. M., Bacchus, A., & Erwin, S. (2012). Policy challenges of increasing automation in driving. *IATSS research*, *35*(2), 79-89.

Kilgore, R., & Voshell, M. (2014, June). Increasing the transparency of unmanned systems: Applications of ecological interface design. In *International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality* (pp. 378-389). Springer, Cham.

Kim, T., & Hinds, P. (2006, September). Who should I blame? Effects of autonomy and transparency on attributions in human-robot interaction. In *Robot and Human Interactive Communication, 2006. ROMAN 2006. The 15th IEEE International Symposium on* (pp. 80-85). IEEE.

Kim, H., Isleib, J. D., & Gabbard, J. L. (2016, March). Casting shadows: Ecological interface design for augmented reality pedestrian collision warning. In *Virtual Reality (VR), 2016 IEEE* (pp. 205-206). IEEE.

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.

Klein, G., Moon, B., & Hoffman, R. R. (2006). Making sense of sensemaking 2: A macrocognitive model. *IEEE Intelligent systems*, *21*(5), 88-92.

Klein, G., Phillips, J. K., Rall, E. L., & Peluso, D. A. (2007). A data-frame theory of sensemaking. In *Expertise out of context: Proceedings of the sixth international conference on naturalistic decision making* (pp. 113-155). New York, NY, USA: Lawrence Erlbaum.

Körber, M., & Bengler, K. (2014, September). Potential individual differences regarding automation effects in automated driving. In *Proceedings of the XV International Conference on Human Computer Interaction* (p. 22). ACM.

Landay, J. A., & Myers, B. A. (1995, May). Interactive sketching for the early stages of user interface design. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 43-50). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co..

Landay, J. A., & Myers, B. A. (2001). Sketching interfaces: Toward more human interface design. *Computer*, *34*(3), 56-64.

Lee, S. H., Ahn, D. R., & Yang, J. H. (2014, October). Mode confusion in driver interfaces for adaptive cruise control systems. In *Systems, Man and Cybernetics (SMC), 2014 IEEE International Conference on* (pp. 4105-4106). IEEE.

Lee, J. D., Hoffman, J. D., Stoner, H. A., Seppelt, B. D., & Brown, M. D. (2006). Application of ecological interface design to driver support systems. In *Proceedings of IEA 2006: 16th World Congress on Ergonomics*.

Lee, J., & Moray, N. (1992). Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems. *Ergonomics*, *35*(10), 1243-1270.

Lee, S. E., Olsen, E. C., & Wierwille, W. W. (2004). *A comprehensive examination of naturalistic lane-changes* (No. FHWA-JPO-04-092). United States. National Highway Traffic Safety Administration.

Lee, J. D., & See, K. A. (2004). Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human factors*, *46*(1), 50-80.

Lei, S., Toriizuka, T., & Roetting, M. (2017). Driver Adaptive Task Allocation: A Field Driving Study. *Le travail humain*, *80*(1), 93-112.

Le Van Quyen, M., & Petitmengin, C. (2002). Neuronal dynamics and conscious experience: an example of reciprocal causation before epileptic seizures. *Phenomenology and the Cognitive Sciences*, *1*(2), 169-180.

Lewis, C. E., Siegel, J. M., & Lewis, M. A. (1984). Feeling bad: exploring sources of distress among pre-adolescent children. *American Journal of Public Health*, *74*(2), 117-122.

Li, Y., & Burns, C. M. (2017). Modeling automation with cognitive work analysis to support human-automation coordination. Journal of Cognitive Engineering and Decision Making, 11(4), 299-322.

Liu, E. Z. F., Lin, C. H., & Chang, C. S. (2010). Student satisfaction and self-efficacy in a cooperative robotics course. *Social Behavior and Personality: an international journal*, *38*(8), 1135-1146.

Llaneras, R. E., Salinger, J., & Green, C. A. (2013). Human factors issues associated with limited ability autonomous driving systems: Drivers' allocation of visual attention to the forward roadway.

Lorenz, L., Kerschbaum, P., & Schumann, J. (2014, September). Designing take over scenarios for automated driving: How does augmented reality support the driver to get back into the loop? In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 58, No. 1, pp. 1681-1685). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Loslever, P. (2001). Obtaining information from time data statistical analysis in human component system studies.(I). Methods and performances. *Information Sciences*, *132*(1-4), 133-156.

Loslever, P. (2014). Membership function design for multifactorial multivariate data characterizing and coding in human component system studies. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, *22*(4), 904-918.

Loslever, P., Popieul, J. C., & Simon, P. (2003). Analyse de données provenant d'unités temporelles relatives au comportement d'un système complexe, II. Exemple: les mouvements oculaires et le système conducteur-véhicule. *Journal européen des systèmes automatisés*, *37*(6), 799-824.

Loslever, P., Schiro, J., Gabrielli, F., & Pudlo, P. (2017). Comparing multiple correspondence and principal component analyses with biomechanical signals. Example with turning the steering wheel. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, *20*(10), 1038-1047.

Loslever, P., Simon, P., Todoskoff, A., Leroux, R., & Angué, J. (1999). Etude sur la méthodologie d'évaluation des interfaces conducteur-véhicule et d'un système de diagnostic de l'état du conducteur.

Louw, T., Merat, N., & Jamson, H. (2015). Engaging with Highly Automated Driving: To be or Not to be in the Loop?.

Lüttgen, G., & Carreno, V. (1999, July). Analyzing mode confusion via model checking. In *International SPIN Workshop on Model Checking of Software* (pp. 120-135). Springer, Berlin, Heidelberg.

Lyons, J. B. (2013). Being Transparent about Transparency.

Lyons, J. B., Sadler, G. G., Koltai, K., Battiste, H., Ho, N. T., Hoffmann, L. C., ... & Shively, R. (2017). Shaping trust through transparent design: theoretical and experimental guidelines. In

Advances in Human Factors in Robots and Unmanned Systems (pp. 127-136). Springer, Cham.

Ma, R., & Kaber, D. B. (2007). Situation awareness and driving performance in a simulated navigation task. *Ergonomics*, *50*(8), 1351-1364.

Macquet, A. C., & Stanton, N. A. (2014). Do the coach and athlete have the same «picture» of the situation? Distributed Situation Awareness in an elite sport context. *Applied ergonomics*, *45*(3), 724-733.

Madhavan, P., & Wiegmann, D. A. (2005). Cognitive anchoring on self-generated decisions reduces operator reliance on automated diagnostic aids. *Human factors*, *47*(2), 332-341.

Manzey, D., Reichenbach, J., & Onnasch, L. (2012). Human performance consequences of automated decision aids: The impact of degree of automation and system experience. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *6*(1), 57-87.

Matthews, M. D., & Beal, S. A. (2002). *Assessing situation awareness in field training exercises*. Military Academy West Point NY Office of Military Psychology and Leadership.

Matthews, M., Bryant, D., Webb, R., & Harbluk, J. (2001). Model for situation awareness and driving: Application to analysis and research for intelligent transportation systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1779), 26-32.

Mayer, R. C., Davis, J. H., & Schoorman, F. D. (1995). An integrative model of organizational trust. *Academy of management review*, *20*(3), 709-734.

Mayer, A. K., Fisk, A. D., & Rogers, W. A. (2009). *Understanding technology acceptance: Effects of user expectancies on human-automation interaction*. Georgia Institute of Technology.

Mayer, A. K., Sanchez, J., Fisk, A. D., & Rogers, W. A. (2006, October). Don't let me down: The role of operator expectations in human-automation interaction. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 50, No. 21, pp. 2345-2349). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications.

McGuinness, B., & Foy, L. (2000, October). A subjective measure of SA: the Crew Awareness Rating Scale (CARS). In *Proceedings of the first human performance, situation awareness, and automation conference, Savannah, Georgia* (Vol. 16).

McGuirl, J. M., & Sarter, N. B. (2006). Supporting trust calibration and the effective use of decision aids by presenting dynamic system confidence information. *Human factors*, *48*(4), 656-665.

Medenica, Z., Kun, A. L., Paek, T., & Palinko, O. (2011, August). Augmented reality vs. street views: a driving simulator study comparing two emerging navigation aids. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services* (pp. 265-274). ACM.

Meerbeek, B., te Kulve, M., Gritti, T., Aarts, M., van Loenen, E., & Aarts, E. (2014). Building automation and perceived control: a field study on motorized exterior blinds in Dutch offices. *Building and Environment*, *79*, 66-77.

Merat, N., & Jamson, A. H. (2009). How do drivers behave in a highly automated car?.

Merat, N., Jamson, A. H., Lai, F. C., Daly, M., & Carsten, O. M. (2014). Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, *27*, 274-282.

Mercado, J. E., Rupp, M. A., Chen, J. Y., Barnes, M. J., Barber, D., & Procci, K. (2016). Intelligent agent transparency in human–agent teaming for Multi-UxV management. *Human factors*, *58*(3), 401-415.

Meyer, G., & Beiker, S. (Eds.). (2014). *Road Vehicle Automation*. Springer International Publishing.

Meyer, G., & Deix, S. (2014). Research and innovation for automated driving in Germany and Europe. In *Road Vehicle Automation* (pp. 71-81). Springer, Cham.

Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do?. In *Human behavior and traffic safety* (pp. 485-524). Springer, Boston, MA.

Miller, C. A. (2014, June). Delegation and transparency: Coordinating interactions so information exchange is no surprise. In *International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality* (pp. 191-202). Springer International Publishing.

Miller, C. A., & Vicente, K. J. (1998, October). Toward an integration of task-and work domain analysis techniques for human-computer interface design. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 42, No. 3, pp. 336-340). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Millot, P. (1987). *Coopération homme-machine dans les tâches de supervision des procédés automatisés* (Doctoral dissertation, Valenciennes).

Millot, P. (1988). Supervision des procédés automatises et ergonomie.

Millot, P., & Debernard, S. (1993, October). Men-machines cooperative organizations: methodological and practical attempts in air traffic control. In *Systems, Man and Cybernetics, 1993.'Systems Engineering in the Service of Humans', Conference Proceedings., International Conference on* (Vol. 1, pp. 695-700). IEEE.

Millot, P., Kamoun, A., Sourmail, N., & Willaeys, D. (1985). Modélisation de l'opérateur humain dans un poste de contrôle d'un procédé automatisé, en vue d'estimer sa charge de travail. In *IASTED Congress" Robotics and Automation* (Vol. 85).

Minge, M., Thüring, M., Wagner, I., & Kuhr, C. V. (2016). The meCUE Questionnaire. A Modular Evaluation Tool for Measuring User Experience. In *Advances in Ergonomics Modeling, Usability & Special Populations. Proceedings of the 7th Applied Human Factors and Ergonomics Society Conference 2016* (pp. 115-128). Springer International Press Switzerland.

Mitchell, W. J., Borroni-Bird, C. E., & Burns, L. D. (2010). Reinventing the automobile. *Personal Urban Mobility for the 21st Century. Cambridge/l\/IA*.

Moray, N., Inagaki, T., & Itoh, M. (2000). Adaptive automation, trust, and self-confidence in fault management of time-critical tasks. *Journal of experimental psychology: Applied*, *6*(1), 44.

Morrison, J. G., Cohen, D., & Gluckman, J. P. (1993). Prospective principles and guidelines for the design of adaptively automated crewstations. *The adaptive function allocation for intelligent cockpits (AFAIC) program: Interim research and guidelines for the application of adaptive automation*, 1-7.

Motors, T. (2015). Tesla Model S. *Palo Alto. Online verfügbar unter http://my. teslamotors. com/de_DE/models/design, zuletzt geprüft am*, *17*, 2015.

Mourant, R. R., & Rockwell, T. H. (1972). Strategies of visual search by novice and experienced drivers. *Human factors*, *14*(4), 325-335.

Muir, B. M. (1987). Trust between humans and machines, and the design of decision aids. *International Journal of Man-Machine Studies*, *27*(5-6), 527-539.

Muir, B. M. (1994). Trust in automation: Part I. Theoretical issues in the study of trust and human intervention in automated systems. *Ergonomics*, *37*(11), 1905-1922.

Muir, B. M., & Moray, N. (1996). Trust in automation. Part II. Experimental studies of trust and human intervention in a process control simulation. *Ergonomics*, *39*(3), 429-460.

Mulder, M., Abbink, D. A., & Boer, E. R. (2012). Sharing control with haptics: Seamless driver support from manual to automatic control. *Human factors*, *54*(5), 786-798.

Mutabazi, M., Russell, E., & Stokes, R. (1998). Drivers' attitudes, understanding, and acceptance of passing lanes in Kansas. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1628), 25-33.

Naikar, N. (2005, September). Theoretical concepts for work domain analysis, the first phase of cognitive work analysis. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 49, No. 3, pp. 249-253). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Naikar, N. (2013). *Work domain analysis: Concepts, guidelines, and cases*. CRC Press.

Naikar, N., Hopcroft, R., & Moylan, A. (2005). *Work domain analysis: Theoretical concepts and methodology* (No. DSTO-TR-1665). Defense science and technology organization Victoria (Australia) air operations div.

Naikar, N., Moylan, A., & Pearce, B. (2006). Analysing activity in complex systems with cognitive work analysis: concepts, guidelines and case study for control task analysis. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *7*(4), 371-394.

Naikar, N., & Sanderson, P. M. (2001). Evaluating design proposals for complex systems with work domain analysis. *Human Factors*, *43*(4), 529-542.

Naranjo, J. E., Gonzalez, C., Garcia, R., & De Pedro, T. (2008). Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *9*(3), 438-450.

Naranjo, J. E., Jiménez, F., García Fernández, F., Armingol Moreno, J. M., Zato, J. G., & Quero, A. (2010). Specification and Development of a HMI for ADAS, Based in Usability and Accessibility Principles.

Naujoks, F., Befelein, D., Wiedemann, K., & Neukum, A. (2017, July). A review of non-driving-related tasks used in studies on automated driving. In *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* (pp. 525-537). Springer, Cham.

Naujoks, F., Forster, Y., Wiedemann, K., & Neukum, A. (2017). Improving usefulness of automated driving by lowering primary task interference through HMI design. *Journal of Advanced Transportation*, *2017*.

Navarro, J. (2016). *De l'analyse de l'activité de conduite automobile à son assistance*. Habilitation à Diriger les Recherches. Université Lyon 2, Lyon, France.

Neisser, U. (1976). *Cognition and reality: Principles and implications of cognitive psychology*. WH Freeman/Times Books/Henry Holt & Co.

Neumann, S., & Segev, E. (1980). EVALUATE YOUR INFORMATION-SYSTEM. *Journal of Systems Management*, *31*(3), 34-41.

Neville, T. J., & Salmon, P. M. (2016). Never blame the umpire–a review of Situation Awareness models and methods for examining the performance of officials in sport. *Ergonomics*, *59*(7), 962-975.

Newman, R. L. (2017). *Head-up displays: Designing the way ahead*. Routledge.

NHTSA [National Highway Traffic Safety Administration]. (2014). U.S. Department of Transportation announces decision to move forward with vehicle-to-vehicle communication technology for light vehicles. Disponible à: http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/2014/USDOT+to+Move+Forward+with+Vehicle-to-Vehicle+Communication+Technology+for+Light+Vehicles

Noland, R., & Seward, H. (1974). Measuring user satisfaction to evaluate performance systems. *Managing the Data Function, West Publishing Co., St. Paul, NM*.

Norman, D. A. (1990). The 'problem'with automation: inappropriate feedback and interaction, not 'over-automation'. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, *327*(1241), 585-593.

Norman, S., Billings, C. E., Nagel, D., Palmer, E., Wiener, E. L., & Woods, D. D. (1988). Aircraft automation philosophy: A source document. *Moffett Field, CA: NASA-Ames Research Center*.

Norris, W. R., Allard, J., Filippov, M. O., Haun, R. D., Turner, C. D. G., Gilbertson, S., & Norby, A. J. (2011). *U.S. Patent No. 7,894,951*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Ochanine, V. A. (1977). Concept of operative image in engineering and general psychology. *Engineering psychology. Moscow: Science Publisher*.

Olsen, E. C. B. (2003). *Modeling slow lead vehicle lane changing* (Doctoral dissertation, Virginia Tech).

Oron-Gilad, T., & Hancock, P. A. (2008). Multi-modal information display under stress. *Performance Under Stress, Human Factors in Defence*, 251-270.

Ososky, S., Sanders, T., Jentsch, F., Hancock, P., & Chen, J. Y. (2014, June). Determinants of system transparency and its influence on trust in and reliance on unmanned robotic systems. In *SPIE Defense+ Security* (pp. 90840E-90840E). International Society for Optics and Photonics.

Pacaux-Lemoine, M. P., & Debernard, S. (2002). Common work space for human–machine cooperation in air traffic control. *Control Engineering Practice*, *10*(5), 571-576.

Pacaux-Lemoine, M. P., Debernard, S., Crévits, I., & Millot, P. (1996). Cooperation between humans and machines: first results of an experimentation of a multi-level cooperative organisation in air traffic control. *Computer Supported Cooperative Work*, *5*(2), 299-321.

Parasuraman, R. (2000). Designing automation for human use: empirical studies and quantitative models. *Ergonomics*, *43*(7), 931-951.

Parasuraman, R., & Manzey, D. H. (2010). Complacency and bias in human use of automation: An attentional integration. *Human factors*, *52*(3), 381-410.

Parasuraman, R., Molloy, R., & Singh, I. L. (1993). Performance consequences of automation-induced'complacency'. *The International Journal of Aviation Psychology*, *3*(1), 1-23.

Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse. *Human factors*, *39*(2), 230-253.

Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A model for types and levels of human interaction with automation. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics-Part A: Systems and Humans*, *30*(3), 286-297.

Park, B. J., Yoon, C., Lee, J. W., & Kim, K. H. (2015, July). Augmented reality based on driving situation awareness in vehicle. In *Advanced Communication Technology (ICACT), 2015 17th International Conference on* (pp. 593-595). IEEE.

Patton, M. Q. (1999). Enhancing the quality and credibility of qualitative analysis. *Health services research*, *34*(5 Pt 2), 1189.

Petermann-Stock, I., Hackenberg, L., Muhr, T., & Mergl, C. (2013). Wie lange braucht der Fahrer? Eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt. *6. Tagung Fahrerassistenzsysteme. Der Weg zum automatischen Fahren*.

Pfannmueller, L., Kramer, M., Senner, B., & Bengler, K. (2015). A comparison of display concepts for a navigation system in an automotive contact analog head-up display. *Procedia Manufacturing*, *3*, 2722-2729.

Piaget, J. (1977). *Les opérations logiques et la vie sociale* (pp. 143-171). Librairie Droz.

Pokam, R. (2016, July). Vers des logiques et des concepts de représentations: une séance de créativité. In *ErgoIA*.

Powers, R. F., & Dickson, G. W. (1973). MisProject management: myths, opinions, and reality. *California Management Review*, *15*(3), 147-156.

Preece, J., Rogers, Y., & Sharp, H. (2002). Interaction Design. Hoboken.

Pugeault, N., & Bowden, R. (2015). How much of driving is preattentive?. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *64*(12), 5424-5438.

Radlmayr, J., Gold, C., Lorenz, L., Farid, M., & Bengler, K. (2014, September). How traffic situations and non-driving related tasks affect the take-over quality in highly automated driving. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 58, No. 1, pp. 2063-2067). Sage CA: Los Angeles, CA: Sage Publications.

Rajaonah, B. (2006). *Rôle de la confiance de l'opérateur dans son interaction avec une machine autonome sur la coopération humain-machine* (Doctoral dissertation, Paris 8).

Rao, A. S., & Georgeff, M. P. (1995, June). BDI agents: from theory to practice. In *ICMAS* (Vol. 95, pp. 312-319).

Rapaczynski, A. (2016). Driverless Cars and the Much Delayed Tort Law Revolution.

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*, (3), 257-266.

Rasmussen, J. (1986). Information processing and human-machine interaction. An approach to cognitive engineering.

Rasmussen, J. (1986B). A framework for cognitive task analysis in systems design. In *Intelligent decision support in process environments* (pp. 175-196). Springer, Berlin, Heidelberg.

Rasmussen, J. (1997). Risk management in a dynamic society: a modelling problem. *Safety science*, *27*(2), 183-213.

Rasmussen, J., Pejtersen, A. M., & Goodstein, L. P. (1994). Cognitive systems engineering.

Rasmussen, J., & Vicente, K. J. (1987). *Cognitive Control of Human Activities and Errors: Implication for Ecological Interface Design*.

Rauffet, P., Chauvin, C., Morel, G., & Berruet, P. (2015, July). Designing sociotechnical systems: a CWA-based method for dynamic function allocation. In *Proceedings of the European Conference on Cognitive Ergonomics 2015* (p. 21). ACM.

Reeves, B., and Nass, C. (1996) The media equation: How people treat computes, television, and new media like real people and places, CLSI Publication, Stanford, CA.

Remilleux, A. (2010). *Explicitation et modélisation des connaissances de conduite du changement à la SNCF. Vers une gestion des connaissances pré-réfléchies*, Thèse de doctorat Telecom Management Sud-Paris, spécialité Sciences Cognitives, Gestion des connaissances.

Renault, Free Up Time with Autonomous Driving© Renault 2018 [consulté le 29 mai 2018].- https://group.renault.com/en/innovation-2/autonomous-vehicle/

Revell, K., Langdon, P., Bradley, M., Politis, I., Brown, J., & Stanton, N. (2018, January). User Centered Ecological Interface Design (UCEID): A Novel Method Applied to the Problem of Safe and User-Friendly Interaction Between Drivers and Autonomous Vehicles. In *International Conference on Intelligent Human Systems Integration* (pp. 495-501). Springer, Cham.

Reymond, G., Heidet, A., Canry, M., & Kemeny, A. (2000, September). Validation of renault's dynamic simulator for adaptive cruise control experiments. In *Proceedings of the Driving Simulator Conference (DSC00)* (pp. 181-191).

Rice, J. R. (1969). The approximation of functions.

Richard, J. F. (1990). Les activités mentales. *Comprendre, raisonner, trouver des solutions. Paris: Armand Colin*.

Rieger, C. A., & Greenstein, J. S. (1982). The allocation of tasks between the human and computer in automated systems. *Proceedings of the IEEE*, 204-208.

Riera, B., & Debernard, S. (2003). Basic cognitive principles applied to the design of advanced supervisory systems for process control. *Handbook of cognitive task design*, 255-281.

Riley, V. (1989, October). A general model of mixed-initiative human-machine systems. In *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting* (Vol. 33, No. 2, pp. 124-128). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Robert, A. D., & Bouillaguet, A. (1997). *L'analyse de contenu*. Presses universitaires de France.

Robinette, P., Li, W., Allen, R., Howard, A. M., & Wagner, A. R. (2016, March). Overtrust of robots in emergency evacuation scenarios. In *Human-Robot Interaction (HRI), 2016 11th ACM/IEEE International Conference on* (pp. 101-108). IEEE.

Rogalski, J. (1994). Formation aux activités collectives. *Le travail humain*, 367-386.

Roncone, A., Mangin, O., & Scassellati, B. (2017, May). Transparent role assignment and task allocation in human robot collaboration. In *Robotics and Automation (ICRA), 2017 IEEE International Conference on* (pp. 1014-1021). IEEE.

Rose, M. (1979). *Servants of post-industrial power?: sociologie du travail in modern France*. Macmillan.

Roth, E. M., & Mumaw, R. J. (1995, October). Using cognitive task analysis to define human interface requirements for first-of-a-kind systems. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 39, No. 9, pp. 520-524). SAGE Publications.

Rotter, J.B. (1967), "A new scale for the measurement of interpersonal trust", Journal of Personality , Vol. 35, pp. 651-65.

Rovira, E., McGarry, K., & Parasuraman, R. (2007). Effects of imperfect automation on decision making in a simulated command and control task. *Human Factors*, *49*(1), 76-87.

Retel-Rude, N., & Retel, O. (2000). *Statistique en psychologie*. In Press éd..

Rupp, J. D., & King, A. G. (2010). *Autonomous driving-A practical roadmap* (No. 2010-01-2335). SAE Technical Paper.

Saad, F. (2002). Ergonomics of the driver's interface with the road environment: the contribution of psychological research. *Human factors for highway engineers*.

Saïd, F., & Chauvin, C. (2017, July). Automated vehicles: multivariate analysis of drivers' take-over behaviour. In *13th ICNC-FSKD Conference 2017*.

Salas, E., Dickinson, T. L., Converse, S. A., & Tannenbaum, S. I. (1992). *Toward an understanding of team performance and training*. Ablex Publishing.

Salas, E., Prince, C., Baker, D. P., & Shrestha, L. (1995). Situation awareness in team performance: Implications for measurement and training. *Human factors*, *37*(1), 123-136.

Salmon, P. M., Regan, M., Lenné, M. G., Stanton, N. A., & Young, K. (2007). Work domain analysis and intelligent transport systems: implications for vehicle design. *International journal of vehicle design*, *45*(3), 426-448.

Salmon, P. M., Stanton, N. A., Walker, G. H., Baber, C., Jenkins, D. P., McMaster, R., & Young, M. S. (2008). What really is going on? Review of situation awareness models for individuals and teams. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *9*(4), 297-323.

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.

Salmon, P., Stephan, K., Lenné, M., & Regan, M. (2005). Cognitive work analysis and road safety: potential applications in road transport. In *Australasian road safety research policing education conference*.

Salmon, P. M., Walker, G. H., & Stanton, N. A. (2016). Pilot error versus sociotechnical systems failure: a distributed situation awareness analysis of Air France 447. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *17*(1), 64-79.

Sanders, T., Oleson, K. E., Billings, D. R., Chen, J. Y., & Hancock, P. A. (2011, September). A model of human-robot trust: Theoretical model development. In *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting* (Vol. 55, No. 1, pp. 1432-1436). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Sanders, T. L., Wixon, T., Schafer, K. E., Chen, J. Y., & Hancock, P. A. (2014, March). The influence of modality and transparency on trust in human-robot interaction. In *Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA), 2014 IEEE International Inter-Disciplinary Conference on* (pp. 156-159). IEEE.

Sanderson, P. M., & Naikar, N. (2000, July). Temporal coordination control task analysis for analysing human-system integration. In *Proceedings of the Human Factors and*

Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 44, No. 1, pp. 206-209). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1994). Pilot interaction with cockpit automation II: An experimental study of pilots' model and awareness of the flight management system. *The International Journal of Aviation Psychology*, *4*(1), 1-28.

Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1995). How in the world did we ever get into that mode? Mode error and awareness in supervisory control. *Human factors*, *37*(1), 5-19.

Sarter, N. B., & Woods, D. D. (1997). Team play with a powerful and independent agent: Operational experiences and automation surprises on the Airbus A-320. *Human factors*, *39*(4), 553-569.

Sarter, N. B., Woods, D. D., & Billings, C. E. (1997). Automation surprises. *Handbook of human factors and ergonomics*, *2*, 1926-1943.

Sauer, J., Chavaillaz, A., & Wastell, D. (2016). Experience of automation failures in training: effects on trust, automation bias, complacency and performance. *Ergonomics*, *59*(6), 767-780.

Scerbo, M. W. (1996). Theoretical perspectives on adaptive automation.

Schaefer, K. E., Billings, D. R., Szalma, J. L., Adams, J. K., Sanders, T. L., Chen, J. Y., & Hancock, P. A. (2014). *A meta-analysis of factors influencing the development of trust in automation: Implications for human-robot interaction* (No. ARL-TR-6984). ARMY RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MD HUMAN RESEARCH AND ENGINEERING DIRECTORATE.

Schiro, J., Loslever, P., Gabrielli, F., & Pudlo, P. (2015). Inter and intra-individual differences in steering wheel hand positions during a simulated driving task. *Ergonomics*, *58*(3), 394-410.

Schmidt, K. (1991). Riding a tiger, or computer supported cooperative work. In *Proceedings of the Second European Conference on Computer-Supported Cooperative Work ECSCW'91* (pp. 1-16). Springer, Dordrecht.

Schmidt, K. (1994). Cooperative work and its articulation: requirements for computer support. *Le travail humain*, 345-366.

Schowengerdt, B. T., Seibel, E. J., Kelly, J. P., Silverman, N. L., & Furness, T. A. (2003, May). Binocular retinal scanning laser display with integrated focus cues for ocular accommodation. In *Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems X* (Vol. 5006, pp. 1-10). International Society for Optics and Photonics.

Schutte, P., Goodrich, K., & Williams, R. (2017). Synergistic allocation of flight expertise on the flight deck (SAFEdeck): a design concept to combat mode confusion, complacency, and skill loss in the flight deck. In *Advances in Human Aspects of Transportation* (pp. 899-911). Springer, Cham.

Seamster, T. L., Redding, R. E., & Kaempf, G. L. (1997). Applied cognitive task analysis in aviation. *Aldershot, United Kingdom: Avebury Aviation, 1997.*

Selcon, S. J., & Taylor, R. M. (1990). Evaluation of the Situational Awareness Rating Technique(SART) as a tool for aircrew systems design. *AGARD, Situational Awareness in Aerospace Operations 8 p(SEE N 90-28972 23-53)*.

Selcon, S. J., Taylor, R. M., & Koritsas, E. (1991, September). Workload or situational awareness?: TLX vs. SART for aerospace systems design evaluation. In Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting (Vol. 35, No. 2, pp. 62-66). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Selkowitz, A., Lakhmani, S., Chen, J. Y., & Boyce, M. (2015, September). The Effects of Agent Transparency on Human Interaction with an Autonomous Robotic Agent. *In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting (Vol. 59, No. 1, pp. 806-810). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.*

Seppänen, H., Mäkelä, J., Luokkala, P., & Virrantaus, K. (2013). Developing shared situational awareness for emergency management. *Safety science*, *55*, 1-9.

Shah, J. J., Smith, S. M., & Vargas-Hernandez, N. (2003). Metrics for measuring ideation effectiveness. *Design studies*, *24*(2), 111-134.

Shahzad, S. S., Brennan, J., Theodossopoulos, D., Hughes, B., & Calautit, J. K. (2015). Energy efficiency and user comfort in the workplace: Norwegian cellular vs. British open plan workplaces. *Energy Procedia*, *75*, 807-812.

Sheridan, T. B. (1988). Task allocation and supervisory control. In *Handbook of human-computer interaction* (pp. 159-173).

Sheridan, T. B., & Verplank, W. L. (1978). Human and computer control of undersea teleoperators. MASSACHUSETTS INST OF TECH CAMBRIDGE MAN-MACHINE SYSTEMS LAB.

Shu, Y., & Furuta, K. (2005). An inference method of team situation awareness based on mutual awareness. *Cognition, Technology & Work*, *7*(4), 272-287.

Simon, L., Tarel, J. P., & Brémond, R. (2009, June). Alerting the drivers about road signs with poor visual saliency. In *Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE* (pp. 48-53). IEEE.

Sinha, R., & Swearingen, K. (2002, April). The role of transparency in recommender systems. In *CHI'02 extended abstracts on Human factors in computing systems* (pp. 830-831). ACM.

Small, M., Anderson, P., Vickers, A., Kay, S., & Fermer, S. (2011). Importance of inhaler-device satisfaction in asthma treatment: real-world observations of physician-observed compliance and clinical/patient-reported outcomes. *Advances in therapy*, *28*(3), 202-212.

Smith, K., & Hancock, P. A. (1995). Situation awareness is adaptive, externally directed consciousness. *Human factors*, *37*(1), 137-148.

SMI Vision, https://www.smivision.com/wp-content/uploads/2017/05/smi_prod_ETG_120Hz_asgm.pdf

Sockeel, P., & Anceaux, F. (2008). *La démarche expérimentale en psychologie*. In Press.

Sorensen, L. J., Stanton, N. A., & Banks, A. P. (2011). Back to SA school: contrasting three approaches to situation awareness in the cockpit. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *12*(6), 451-471.

Sperandio, I. C. (1980) La psychologie en ergonomie. France: Presses Universitaires de France

Stanton, N. A., & Marsden, P. (1996). From fly-by-wire to drive-by-wire: safety implications of automation in vehicles. *Safety Science*, *24*(1), 35-49.

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.

Stanton, N. A., & Young, M. S. (1998). Vehicle automation and driving performance. *Ergonomics*, *41*(7), 1014-1028.

Stanton, N. A., & Young, M. S. (2005). Driver behaviour with adaptive cruise control. *Ergonomics*, *48*(10), 1294-1313.

Stanton, N. A., Young, M., & McCaulder, B. (1997). Drive-by-wire: The case of driver workload and reclaiming control with adaptive cruise control. *Safety science*, *27*(2-3), 149-159.

Stanton, N. A., Salmon, P. M., & Walker, G. H. (2015). Let the reader decide: A paradigm shift for situation awareness in sociotechnical systems. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, *9*(1), 44-50.

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.

Stanton, N. A., Salmon, P., Walker, G. H., & Jenkins, D. (2009). *Human factors in the design and evaluation of central control room operations*. CRC Press.

Stanton, N. A., Salmon, P. M., Walker, G. H., & Jenkins, D. P. (2010). Is situation awareness all in the mind?. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, *11*(1-2), 29-40.

Stanton, N. A., Walker, G. H., Young, M. S., Kazi, T., & Salmon, P. M. (2007). Changing drivers' minds: the evaluation of an advanced driver coaching system. *Ergonomics*, *50*(8), 1209-1234.

Stanton, N. A., Young, M. S., Walker, G. H., Turner, H., & Randle, S. (2001). Automating the driver's control tasks. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, *5*(3), 221-236.

Sutherland, I. E. (1968, December). A head-mounted three-dimensional display. In *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I* (pp. 757-764). ACM.

Tambe, M., Scerri, P., & Pynadath, D. V. (2002). Adjustable autonomy for the real world.

Tang, A., Owen, C., Biocca, F., & Mou, W. (2003, April). Comparative effectiveness of augmented reality in object assembly. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 73-80). ACM.

Tattegrain-Veste, H., Bellet, T., Pauzié, A., & Chapon, A. (1996). Computational driver model in transport engineering: COSMODRIVE. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1550), 1-7.

Tesch, R. (1990). Qualitative Research: Analysis Types and Software Tools. Basingstoke: Falmer.

Tonnis, M., Sandor, C., Klinker, G., Lange, C., & Bubb, H. (2005, October). Experimental evaluation of an augmented reality visualization for directing a car driver's attention. In *Mixed and Augmented Reality, 2005. Proceedings. Fourth IEEE and ACM International Symposium on* (pp. 56-59). IEEE.

Theeuwes, J., & Godthelp, H. (1995). Self-explaining roads. *Safety science*, *19*(2-3), 217-225.

Trimble, T. E., Bishop, R., Morgan, J. F., & Blanco, M. (2014). Human factors evaluation of level 2 and level 3 automated driving concepts: Past research, state of automation technology, and emerging system concepts.

Ulbrich, S., Menzel, T., Reschka, A., Schuldt, F., & Maurer, M. (2015, September). Defining and substantiating the terms scene, situation, and scenario for automated driving. In

Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2015 IEEE 18th International Conference on (pp. 982-988). IEEE.

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.

Van den Beukel, A. P., & Van der Voort, M. C. (2013). Retrieving human control after situations of automated driving: How to measure situation awareness. In *Advanced Microsystems for Automotive Applications 2013* (pp. 43-53). Springer, Heidelberg.

Van Elslande, P. (2001). Erreur de conduite et besoin d'aide: une approche accidentologique. *Journée d'Etude en Psychologie Ergonomique-Epique*, 51-62.

Van Harreveld, F., Rutjens, B. T., Rotteveel, M., Nordgren, L. F., & Van Der Pligt, J. (2009). Ambivalence and decisional conflict as a cause of psychological discomfort: Feeling tense before jumping off the fence. *Journal of Experimental Social Psychology*, *45*(1), 167-173.

Van Krevelen, D., & Poelman, R. (2007). Augmented Reality: Technologies, Applications, and Limitations.

Van Krevelen, D. W. F., & Poelman, R. (2010). A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. *International journal of virtual reality*, *9*(2), 1.

Vagia, M., Transeth, A. A., & Fjerdingen, S. A. (2016). A literature review on the levels of automation during the years. What are the different taxonomies that have been proposed?. *Applied ergonomics*, *53*, 190-202.

Vermersch, P. (1998). Husserl et l'attention. *Expliciter (24): 7*, *24*.

Vermersch, P. (2000). Conscience directe et conscience réfléchie. *Intellectica*, *31*(2), 269-311.

Vermersch, P. (2001). Psychophénoménologie de la réduction. *Revue Expliciter*, (42), 1-19.

Vicente, K. J. (1999). *Cognitive work analysis: Toward safe, productive, and healthy computer-based work*. CRC Press.

Vicente, K. J. (2002). Ecological interface design: Progress and challenges. *Human factors*, *44*(1), 62-78.

Vicente, K. J., & Burns, C. M. (1995). *A Field Study of Operator Cognitive Monitoring at Pickering Nuclear Generating Station*. Technical Report CEL 9504, Cognitive Engineering Laboratory, University of Toronto.

Vicente, K., & Pawlak, W. (1994). Cognitive work analysis for the DURESS II system. *Cognitive Engineering Laboratory, Department of Industrial Engineering, Toronto, Canada CEL*, 94-93.

Vicente, K. J., & Rasmussen, J. (1992). Ecological interface design: Theoretical foundations. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, *22*(4), 589-606.

von Schantz, S., Katajavuori, N., Antikainen, O., & Juppo, A. (2016). Evaluation of dry powder inhalers with a focus on ease of use and user preference in inhaler-naive individuals. *International journal of pharmaceutics*, *509*(1-2), 50-58.

Vygotsky, L. S. (1962). Thought and language MIT press. *Cambridge, Mass*.

Waag, W. L., & Houck, M. R. (1994). Tools for assessing situational awareness in an operational fighter environment. *Aviation, space, and environmental medicine*.

Wagar, B. M., & Dixon, M. J. (2005). Past experience influences object representation in working memory. *Brain and Cognition*, *57*(3), 248-256.

Wallas, G. (1926). The art of thought.

Ward, N.J., Humphreys, M., & Fairclough, S. (1996). A field study of behavioural adaptation with an autonomous intelligent cruise control system. Handbook of the International Conference on Traffic and Transport Psychology, 22-25 May, Valencia, Spain, 15-19.

Watts, G. R., & Quimby, A. R. (1980). *ASPECTS OF ROAD LAYOUT THAT AFFECT DRIVERS'PERCEPTION AND RISK TAKING* (No. TRRL LR920 Monograph).

Wei, J., Snider, J. M., Kim, J., Dolan, J. M., Rajkumar, R., & Litkouhi, B. (2013, June). Towards a viable autonomous driving research platform. In *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE* (pp. 763-770). IEEE.

Wickens, C.D. (1984). Engineering psychology and human performance. Columbus, OH: Merrill

Wickens, C. D., & Hollands, J. (1999). Engineering Psychology And Human Performance", 1992. *Glenview, IL: Scott, Foreman, and Co*.

Wickens, C. D., Hollands, J. G., Banbury, S., & Parasuraman, R. (2015). *Engineering psychology & human performance*. Psychology Press.

Wiegmann, D. A., Eggman, A. A., ElBardissi, A. W., Parker, S. H., & Sundt III, T. M. (2010). Improving cardiac surgical care: a work systems approach. *Applied ergonomics*, *41*(5), 701-712.

Wiener, E. L. (1981, March). Complacency: Is the term useful for air safety. In *Proceedings of the 26th Corporate Aviation Safety Seminar* (Vol. 117).

Willmore, T. J. (2013). *An introduction to differential geometry*. Courier Corporation.

Wright, T. J., Horrey, W. J., Lesch, M. F., & Rahman, M. M. (2016, September). Drivers' trust in an autonomous system: Exploring a covert video-based measure of trust. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 60, No. 1, pp. 1334-1338). Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Young, A. H., Mackenzie, A. K., Davies, R. L., & Crundall, D. (2017). Familiarity breeds contempt for the road ahead: The real-world effects of route repetition on visual attention in an expert driver. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*.

Young, M. S., Stanton, N. A., & Harris, D. (2007). Driving automation: learning from aviation about design philosophies. *International Journal of Vehicle Design*, *45*(3), 323-338.

Yuviler-Gavish, N., & Gopher, D. (2011). Effect of descriptive information and experience on automation reliance. Human Factors, 53, 230–244.

Zeeb, K., Buchner, A., & Schrauf, M. (2015). What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving. *Accident Analysis & Prevention*, *78*, 212-221.

Zhou, F., Duh, H. B. L., & Billinghurst, M. (2008, September). Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR. In *Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (pp. 193-202). IEEE Computer Society.

Zokai, S., Esteve, J., Genc, Y., & Navab, N. (2003, October). Multiview paraperspective projection model for diminished reality. In *Mixed and Augmented Reality, 2003. Proceedings. The Second IEEE and ACM International Symposium on* (pp. 217-226). IEEE

Annexes

Annexe 1 : Hiérarchie d'Abstraction de la voiture autonome

Les analyses que nous présentons ci-après ont été obtenues après plusieurs itérations. Grâce à de nombreux articles de la littérature tels que JAMIESON ET AL. (2004), JENKINS, STANTON, WALKER, SALMON & YOUNG (2008) et des interviews avec les collaborateurs du projet LRA, nous avons identifié les éléments suivants :

- Les **buts fonctionnels** : Il s'agit des buts de chaque entité. Pour la voiture autonome, nous en avons identifié trois principaux : i) un transport sur route qui s'effectue en sécurité ; ii) un transport sur route efficient, c'est-à-dire qui optimise la consommation de carburant du véhicule, la durée du trajet et limite les zones congestionnées ; iii) un transport sur route confortable.

- **Les valeurs et les mesures de priorité**. Elles correspondent aux principes, priorités et valeurs à suivre pour atteindre les buts fonctionnels. Nous en avons identifié cinq principales pour la voiture autonome : i) la réduction de la fréquence des accidents ; ii) la réduction de la gravité des accidents ; iii) l'augmentation de la fluidité du trafic (grâce au désengorgement) ; iv) la diminution du temps consacré à la tâche de conduite ; v) l'augmentation du temps consacré à des tâches de non conduite ; vi) le contrôle technique réalisé ; vii) la possibilité de choisir entre un mode autonome et un mode manuel.

- **Les fonctions relatives aux buts.** Pour la voiture autonome, les fonctions relatives aux buts incluent : i) la sélection d'un itinéraire, ii) le suivi de voie, iii) le changement de voie, iv) protection de l'agent humain à l'intérieur du véhicule.

- **Les fonctions relatives aux objets**. Ce niveau présente les capabilités fonctionnelles [49]et des limites des objets physiques présents dans le système (NAIKAR, HOPCROFT & MOYLAN, 2005). Pour la voiture autonome, il s'agit
  - i) Des capacités et des limites des composants chargés de prendre des informations de l'environnement de conduite. Il s'agit des capteurs dont les principaux sont mis en évidence dans Tableau 44.
  - ii) Des capacités et des limites des composants chargés d'analyser la situation de conduite ;
  - iii) Des capacités et des limites des composants chargés de prendre des prendre des décisions ;
  - iv) Des capacités et des limites des composants chargés de mettre en œuvre les manœuvres.

Tableau 44 : Capteurs de la voiture autonome

Nom du capteur	Rôles
GPS	4. Calculer l'itinéraire entre un point A et un point B ; 5. Visualiser l'itinéraire par carte ; 6. Déterminer la position du véhicule.

[49] Functional capabilities

Capteur infrarouge	2. Détecter les lignes et les obstacles pour s'assurer que la voiture reste bien sur la voie et ne gêne pas les autres voitures.
Radar	3. Détecter la position des objets environnants, proches ou éloignés ; 4. Évaluer la distance d'un véhicule par rapport aux véhicules les plus proches.
Lidar *(capteur multidimensionnel rotatif)*	2. Générer une carte 3D de l'environnement de la voiture, sur une portée de 60m.
Odomètre roue	1. Mesurer la vitesse ou la distance parcourue par la voiture, par le nombre de rotations des roues
Accéléromètre	2. Mesurer l'accélération
Capteur à ultrasons	2. Aider au stationnement sur une portée de 3m
Caméra stéréoscopique	3. Repérer les feux ; 4. Déchiffrer les panneaux et aide l'ordinateur à détecter les objets mobiles.
Système anti-franchissement de lignes	3. Détecter les variations au sol qui sont analysées par des algorithmes 4. Chercher des zones de couleur blanche en forme de ligne, à l'aide de caméras.
Centrale à inertie	3. Intégrer les mouvements de la voiture pour estimer son orientation et sa position 4. Compléter les données GPS.

- **Les objets physiques.** Un véhicule autonome de niveau SAE 4 regroupe différents composants : i) les capteurs qui assurent la fonction « acquisition de l'information » ; ii) Les algorithmes qui assurent la fonction « analyse de l'information » et iii) la fonction « prise de décision » ; iv) Les actionneurs qui assurent la fonction « implémentation de l'action ».

La Figure 83 explicite la Hiérarchie d'abstraction pour la voiture autonome et l'unité fonctionnelle « changement de voie » avec la mise en évidence de quelques liaisons entre les différents niveaux. Pour des raisons de lisibilité, toutes les liaisons n'ont pas été représentées.

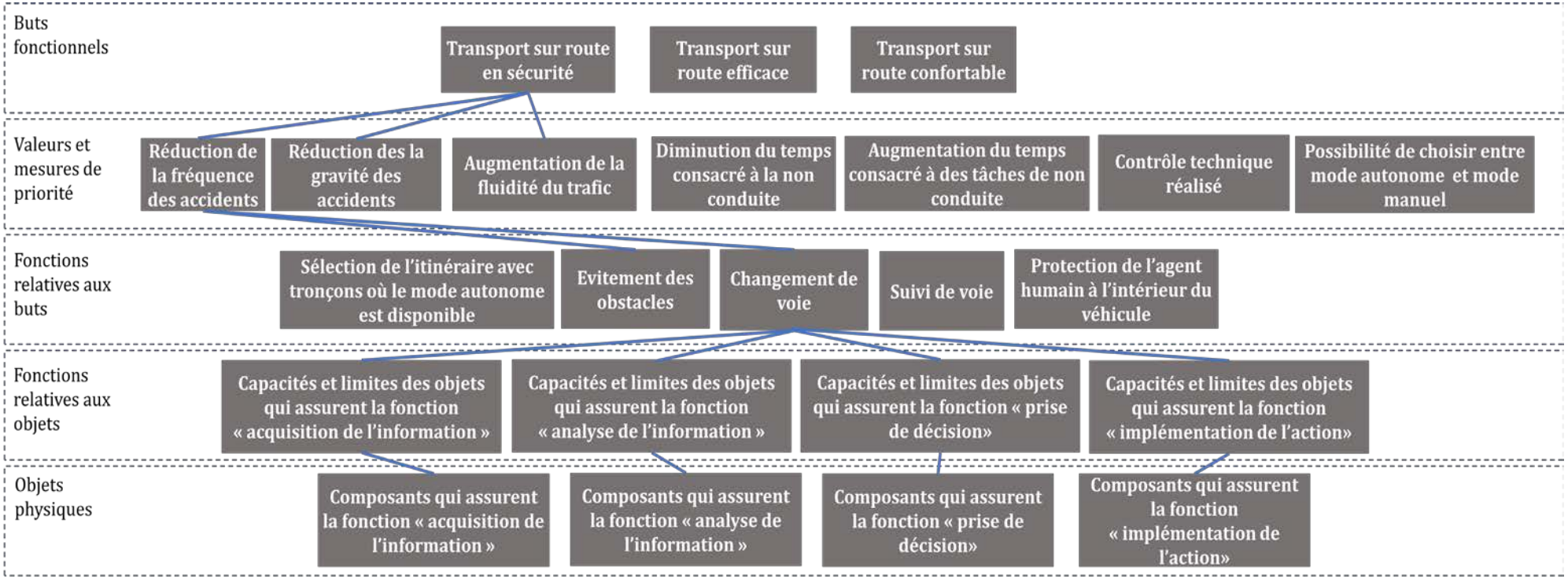


Figure 83: Extrait d'analyse du domaine de travail de la voiture autonome. Les lignes bleues mettent en évidence entre les différents niveaux.

Annexe 2 : Questionnaire Q0 sur les habitudes de conduite

Profession : ……
Age : ……
Sexe : ……
Date de la passation : ……

A-1 Votre voiture : _____

A-2 Nombre d'années de conduite : _____

A-3 Quel est le nombre de kilomètres que vous parcourez par semaine
Moins de 20 km ☐
Entre 20 et 50 km ☐
Entre 50 et 100 km ☐
Entre 100 et 250 km ☐
Entre 250 et 500 km ☐
Plus de 500 km ☐

A-4 Avez-vous déjà été victime d'accidents ?
OUI ☐ NON ☐

A-5 Si oui, dans quelles circonstances :
_____
_____
_____
_____

A-6 Êtes-vous stressé lorsque vous conduisez ?
Jamais _____ Toujours

A-7 Comment caractérisez-vous votre conduite ? ***(entourer la réponse choisie)***
NERVEUSE NORMALE ECONOMIQUE

A-8 Avez-vous déjà conduit en simulateur ?
OUI ☐ NON ☐

A-9 Si oui le(s)quel(s) ?
_____
_____

A-10 Vous jouez à des jeux de simulation de conduite type "PC" ou "console de jeux" :
JAMAIS RAREMENT PARFOIS SOUVENT ***(entourer la réponse choisie)***

A-11 Pour vous, les nouvelles technologies sont :
Très déplaisantes ——————————————————— Très plaisantes

A-12 En général, en conduite en file, avez-vous tendance à suivre de très près le véhicule de devant ou avez-vous tendance à prendre vos distances ?
Distance faible ——————————————————— Distance importante

A-13 En général sur autoroute, avez-vous tendance à faire beaucoup de manœuvres (changements de file et dépassements) ?
OUI ☐ NON ☐ MOYENNEMENT ☐

A-14 Sur autoroute, quelle file avez-vous tendance à occuper ?
15. a Autoroute à 2 voies : voie droite ☐ voie gauche ☐
15. b Autoroute à 3 voies : voie droite ☐ voie milieu ☐ voie gauche ☐

A-15 Appréciez-vous de conduire dangereusement ?
Pas du tout ——————————————————— Tout à fait

A-16 Les nouvelles technologies vous rendent-elles anxieux ?
Pas du tout ——————————————————— Très

A-17 Quand je conduis, je…..
Pense facilement à autre chose ——————————————————— Suis très attentif

A-18 Dans votre conduite de tous les jours, comment estimez-vous votre façon de gérer la distance de sécurité par rapport au véhicule qui vous précède ?
Peu sécuritaire ——————————————————— Très sécuritaire

A-19 Dans l'activité de conduite,
Je contrôle ce qui ce passe ——————————————————— Je suis à la merci des autres

A-20 Avez-vous déjà utilisé un régulateur de vitesse et d'interdistance ?
OUI ☐ NON ☐

A-21 Avez-vous déjà utilisé un régulateur de vitesse ?
OUI ☐ NON ☐

A-22 La conduite
Me coûte un gros effort ——————————————————— Ne me coûte aucun effort

A-23 Pensez-vous être un conducteur prudent ?
Peu prudent ——————————————————— Très prudent

A-24 Quels sont les dispositifs automatiques disponibles dans le véhicule que vous avez l'habitude de conduire ?

_____

A-25 Parmi ceux-là, lesquels utilisez-vous ?

_____

A-26 Pour ceux que vous n'utilisez pas, pourriez-vous donner la raison de leur non utilisation ?

_____

_____

A-27 De manière générale, vous considérez-vous comme quelqu'un d'anxieux ?
Pas du tout ——————————————————— Très

A-28 Lorsqu'un véhicule tente de s'insérer devant votre véhicule, que faites-vous ?
Vous accélérez pour l'en empêcher ☐
Vous freinez pour le laisser faire ☐
Vous ne faites rien de particulier ☐

A-29 Dans la conduite automobile, la responsabilité incombe principalement :
A moi ——————————————————— Aux autres

A-30 La conduite est une activité :
Très risquée ——————————————————— Très peu risquée

A-31 L'influence que l'environnement et le trafic ont sur votre maîtrise du véhicule est :
Très Faible ——————————————————— Très élevée

Annexe 3 : Questionnaire Q1 sur la Situation Awareness

Simulation ☐
Condition expérimentale ☐
Scénario ☐
Scène ☐

G1. Quelle est l'action de votre véhicule ?

a. Suivi de voie
b. Changement de voie vers la gauche
c. Changement de voie vers la droite

Bonne réponse :……..

G2. Quelle est la dynamique de votre véhicule ?

a. Accélération
b. Décélération
c. Vitesse constante

Bonne réponse : ……..

G3. Le véhicule est-il en-dessous de la vitesse légale ?

Oui ☐ Non ☐

Bonne réponse :……..

G4. Quelle est l'action à venir de votre véhicule ?

a. Suivi de voie
b. Changement de voie vers la gauche
c. Changement de voie vers la droite

Bonne réponse :……..

G5. Combien y avait-il de voitures devant le véhicule autonome ?

0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐

G5. Combien y avait-il de voitures derrière le véhicule autonome ?

0 ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐

Annexe 4 : Questionnaire Q2 pour l'évaluation de chaque IHM

Numéro de la passation ☐
Condition expérimentale ☐
Scénario ☐

Veuillez mettre une croix sur la ligne (quand vous la voyez), à l'emplacement qui vous semble le plus approprié en fonction de ce que vous pensez.

C1. Suite à ma conduite sur le simulateur, je pense savoir comment fonctionne l'IHM
Pas du tout ——————————————— Tout à fait

C2. Je trouve l'IHM
Très déplaisant ——————————————— Très plaisant

C3. Comprendre l'IHM
M'a coûté un gros effort ——————————————— Ne m'a coûté aucun effort

C4. Grâce à cette IHM, je parviens à prédire ce que va faire le dispositif
Jamais ——————————————— Très souvent

C5. Cette IHM facilite la compréhension de ce que fait le système
Pas du tout ——————————————— Tout à fait

C6. Cette IHM facilite la compréhension de l'environnement de conduite
Pas du tout ——————————————— Tout à fait

C7. L'IHM me parait utile
Pas du tout utile ——————————————— Très utile
Pour quelles informations en particulier ? *(Les 4 premières uniquement)*
1……
2……
3……
4……

C8. Cette IHM a des informations inutiles
Oui ☐ Non ☐
Si oui, lesquelles ? *(Les 4 premières uniquement)*
1……
2……
3……
4……

C9. Cette IHM a des informations que j'aurais voulu voir mais que je n'ai pas vues
Oui ☐ Non ☐

Si oui, lesquelles ? *(Les 4 premières uniquement)*

1……..

2……..

3……..

4……..

C10. Avec cette IHM

Je n'étais pas du tout confiant ——————————————————————————— J'étais très confiant

Annexe 5 : ACM dans un système à composante humaine (SCH). Exemple didactique avec le questionnaire relatif aux habitudes de conduite.

Principes généraux

La Figure 84 montre une échelle possible de fenêtrage et le Tableau 45 montre l'avantage de faire des fenêtres avant de calculer les moyennes.

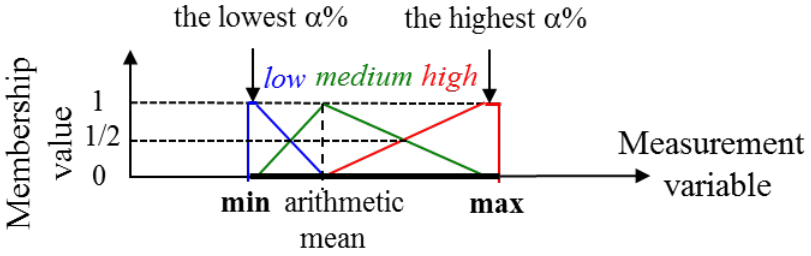


Figure 84 : Principe de fenêtrage flou avec nos variables quantitatives

Tableau 45 : Comparaison de la fenêtre d'absence vs. Présence avant le résumé. Trois exemples quand l'intervalle de la variable est [0, 10] avec deux individus. a) Les trois moyennes arithmétiques sont identiques, b) Les triplets des Moyennes des valeurs d'Appartenance sont différents

Pair of data pieces	Valeurs initiales	a) Moyenne arithmétique	Valeurs initiales d'appartenance avec le fenêtrage floue			b) Moyennes des valeurs d'appartenance		
			Faible	Moyen	Élevé	Faible	Moyen	Elevé
1)	0	5	1	0	0	0.5	0	0.5
	10		0	0	1			
2)	5	5	0	1	0	0	1	0
	5		0	1	0			
3)	4	5	0.2	0.8	0	0.1	0.8	0.1
	6		0	0.8	0.2			

ACM des variables d'identification d'un participant

Les cinq variables quantitatives (A, DM, CL, EL et PL) ont été subdivisées en trois fonctions d'appartenance en utilisant le codage de la Figure 84. Les histogrammes et les fenêtrages correspondant sont représentés dans la Figure 85.

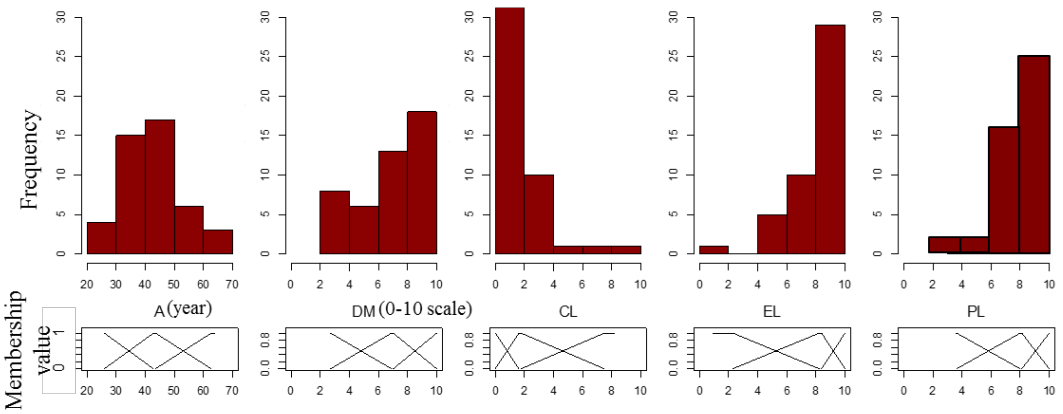


Figure 85 : Histogrammes et fenêtrage flou pour les 5 variables quantitatives

Si l'histogramme de l'âge (A) respecte la distribution gaussienne, ce qui est consistant avec la façon dont les participants ont été sélectionnés, les autres histogrammes sont très éloignés de cette distribution. Plus précisément, plusieurs sous-intervalles de l'intervalle [0 ; 10] sont rares ou jamais utilisés. Pour montrer directement les différences interindividuelles, un tableau dans lequel les lignes correspondent aux participants est construit, chaque colonne représentant une modalité, c'est-à-dire Homme ou Femme pour le genre (G), Oui ou Non pour l'utilisation du Simulateur (SU), faible, moyenne, et élevé pour chacune des 5 variables quantitatives. Soit Y0 ce tableau avec 45 lignes et (2*2) +(5*3) =19 colonnes.

Le ACM de Y0 permet d'obtenir 4 axes principaux représentant respectivement 25%, 15%, 13% et 12% de la variance totale. Nous commenterons les résultats sur les dimensions 1 et 2 (nommé le premier plan principal), le pourcentage cumulé étant plus élevé que lorsqu'on combine les dimensions 3 et 4.

L'axe 1 est principalement contrôlé par 1) *PLh* (prudence élevée), 2) *DMh* (distance de sécurité élevée), 3) *CLl* (*contrôle faible*) et 4) *ELh* (*effort de conduite faible*) (Figure 86.a à droite). La position très à droite du participant JB correspond aux réponses 10, 10, 0 et10 pour les variables *PL*, *DM, CL* et EL respectivement, Figure 86.c.

Nous précisons que le côté gauche de l'axe 1 n'est pas une combinaison des 4 fenêtres opposées, c'est-à-dire *PLl, DMl, CLh* et *ELl*, ce qui corrobore les histogrammes correspondants. Par exemple, si nous nous focalisons sur le participant SL situé très à gauche, les réponses sont 4, 4, 1 et 7 pour les variables *PL, DM, CL* et *EL* respectivement, Figure 86.c. L'absence de combinaison signifie qu'il y a une absence de relations linéaires fortes entre les 4 variables (les trajectoires PL, DM, CL et EL représentées dans la Figure 86.a ne sont pas proches, ce qui est confirmé par les valeurs des coefficients de corrélation linéaire. Par exemple, la valeur maximale est r(*PL, DM*)=0.6, mais r(*PL, CL*)=-0.2 et r(*PL, EL*)=0.1 seulement.

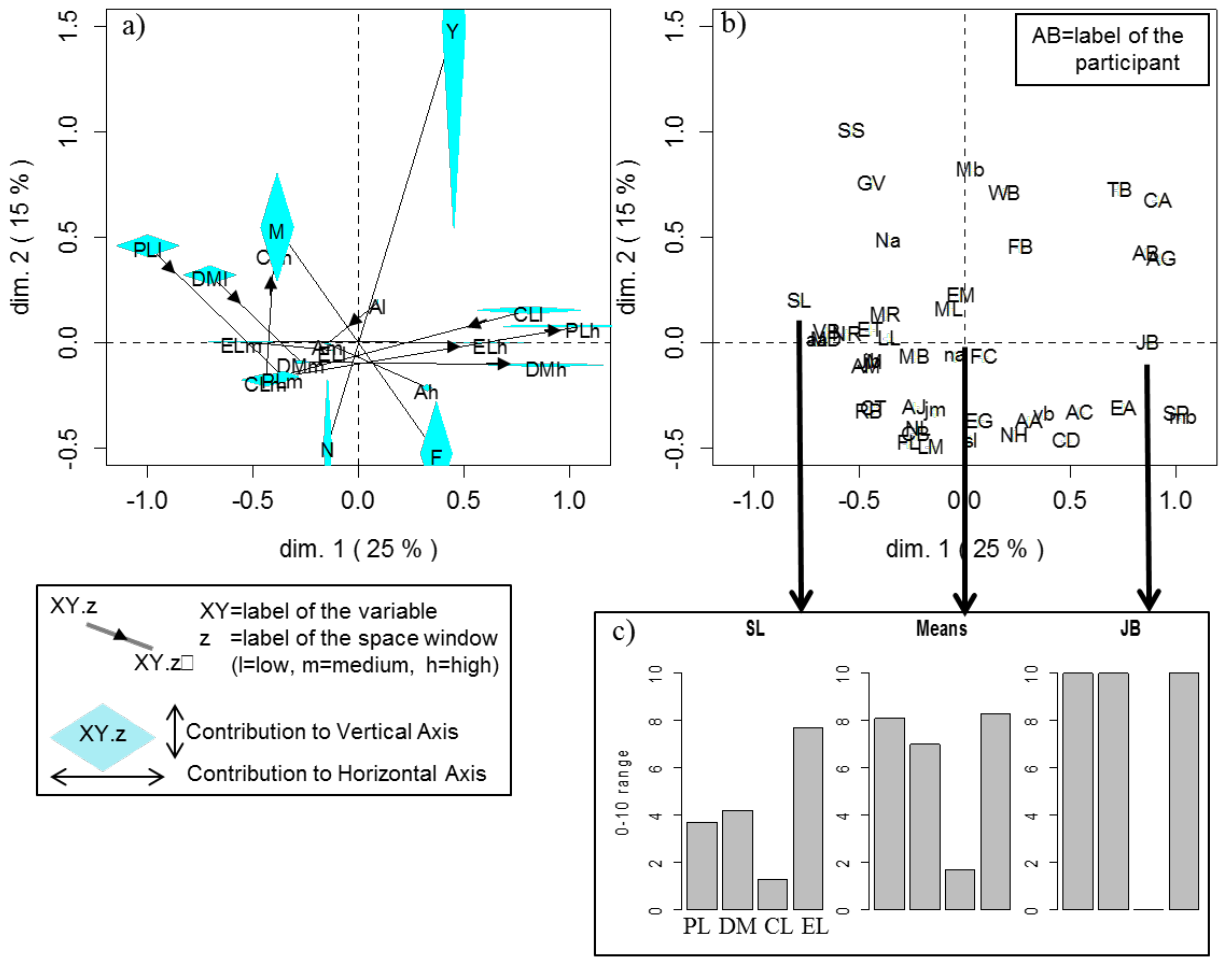


Figure 86 : ACM de sept variables d'identification (cas du premier plan principal). A) Projection des 19 points-colonnes correspondant aux 19 modalités (pour les 5 variables quantitatives, les 3 modalités sont reliées dans la direction faible-moyenne-élevé) b) Projection des 45 points-lignes correspondant aux 45 participants. c) Profils relatifs aux variables avec une grande contribution dans l'axe de contrôle 1 (PL, DM, CL et EL) pour deux participants opposés (SL et JB); les profils établis sur la base des moyennes arithmétiques sont également montrés.

Avant de se focaliser sur l'axe 2, un parallèle intéressant peut être fait avec la mécanique. En effet, si nous gardons en mémoire que l'intersection entre les axes principaux correspond au centre de gravité, la position éloignée d'un point signifie que la masse de ce point est faible. Par conséquent, les positions relatives des points-colonnes montrent non seulement les relations entre les variables mais également les fréquences respectives des modalités. Si la fréquence est très faible (imaginons qu'un seul participant a utilisé une modalité « élevée » de la variable V), le point *Vh* va avoir une position aberrante, ce qui correspond à un comportement actuel mais aussi à une donnée douteuse (c'est-à-dire qui provient d'une erreur d'entrée de la donnée ou un dysfonctionnement matériel). La possibilité de montrer les valeurs aberrantes n'est pas possible avec l'Analyse de Composant Principal (ACP) usuel puisque tous les points sont dans un cercle de 1 radius.

L'axe 2, qui est principalement contrôlé par les 4 modalités des variables qualitatives, montre une correspondance entre les hommes (modalité *M*) et la modalité *Y* en ce qui concerne l'utilisation du simulateur (Figure 86.a en haut), et une correspondance entre les femmes (modalité *F*) et la modalité *N* en ce qui concerne l'utilisation du simulateur. S nous nous focalisons sur la variable Utilisation du Simulateur, il apparaît que la modalité *Y* est moins

fréquente que la modalité *N* (11 « oui » vs. 34 « non »). Le nombre d'occurrences de la paire (*M, Y*) est faible (6 hommes seulement ; par exemple, voir le participant Mb sur le côté positif. La paire opposée, (*F, N*), sur le côté négatif de l'axe 2, est plus fréquente (18 occurrences).

Si nous combinons la signification des deux axes, un regard rapide sur le premier plan principal permet de constater qu'il ni valeurs ni de classes aberrantes et à partir d'une analyse profonde, nous pouvons ajouter que 1) les variables *Genre* et *Utilisation du Simulateur* (G et SU) ne sont que peu connectées aux 4 variables relatives à l'évaluation du comportement de conduite (*PL, DM, CL* et *EL*) et 2) la variable Age (A) n'est pas liée à ces 6 variables (*Al, Am* et *Ah* sont proches de la position 0, Figure 86; en fait la contribution de la modalité Age est élevée pour l'axe 4 uniquement). Pour montrer cela plus directement, focalisons sur les variables PL, DM, CL et S à travers deux moyennes (Figure 87).

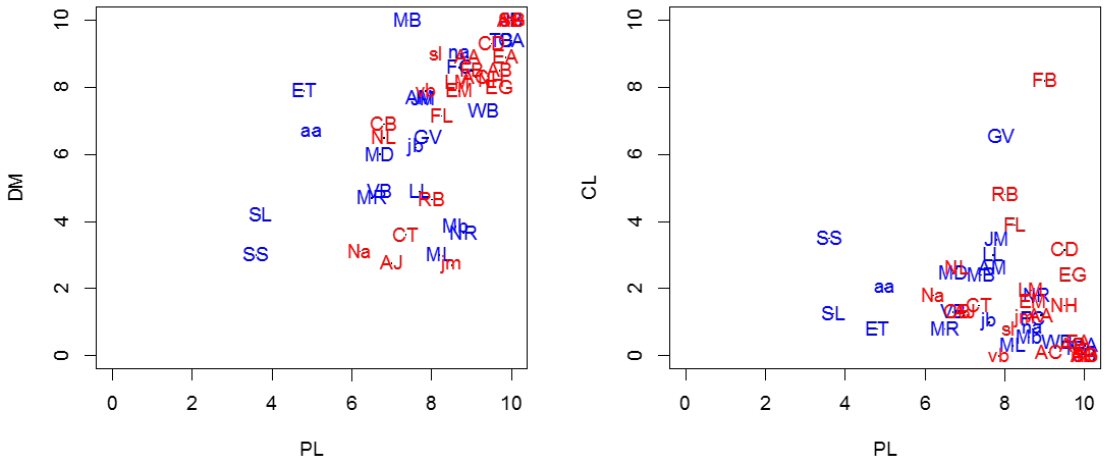


Figure 87 : Deux graphiques qui montrent plus directement les principaux résultats de l'ACM (r correspond au coefficient de corrélation linéaire)

De la Figure 87, il apparait que :

- Les relations entre les variables quantitatives ne sont pas toujours linéaires, mais il y a des correspondances locales entre *PL, DM* et *CL*, notamment pour le triplet (*PLh, DMh, CLl*) ;
- La relation entre les 3 variables quantitatives *PL, DM* et *CL* et la variable qualitative *G* est pauvre. Par exemple, si le test de classement de Wilcoxon est utilisé, les valeurs de p sont 0,04 ; 0,3 et 0,9 respectivement.

Ce qu'il faut relever avec l'ACM est qu'une fois que les axes principaux ont été trouvés, il est possible de représenter des points supplémentaires (BENZECRI, 1992). Trois aspects peuvent être considérés :

- **Aspect 1** : De nouvelles variables ou individus peuvent être insérés par rapport aux données initiales. Par exemple, imaginons qu'un jeune participant qui utilise souvent un simulateur mais qui répond aux quatre questions sans prendre en considération à l'échelle, c'est-à-dire qu'il met une croix proche de l'extrémité gauche pour chacune des 4 variables *PL, DM, CL* et EL. La Figure 88 montre cet individu imaginaire.

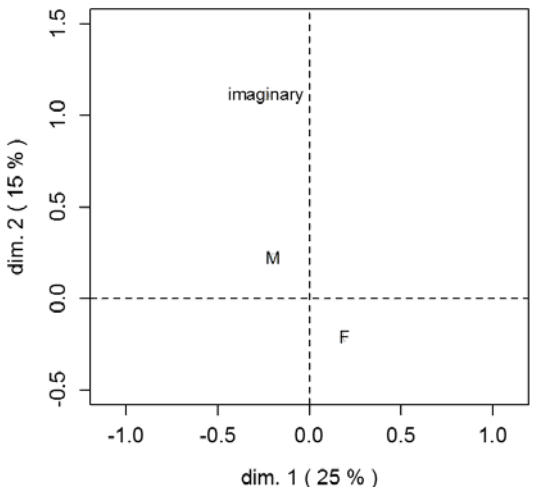


Figure 88 : Deux exemples de points lignes supplémentaires. 1) l'objectif est de situer un nouveau participant, nommé "imaginary", en relation avec les 45 premiers participants et 2) l'objectif est de montrer l'effet du facteur G (genre) qui conduit à deux profils moyens: un pour les hommes (point M) et un pour les femmes (point F)

- **Aspect 2** : Les effets des facteurs peuvent être montrés. Par exemple, considérons le facteur G (Genre). Pour chaque modalité (M et F), un profil moyen est calculé et représenté par un point. La Figure 88 montre que l'effet du genre est faible, étant donné le grand nuage de points qui contient les 45 participants, Figure 86.b. Il est important de relever que pour montrer les effets des facteurs, une procédure de résumé est nécessaire (voir par exemple l'analyse habituelle de la variance), et le fenêtrage spatial réalisé avant le calcul des moyennes réduit l'information moins que la moyenne arithmétique usuelle.

- **Aspect 3** : Avec les variables quantitatives, l'ACM est capable de montrer les relations complexes tandis que l'ACP ne met en évidence que les relations linéaires. Le graphique réalisé avec l'ACM est plus complexe qu'avec l'ACP. Considérons les deux variables qui jouent un rôle important sur l'axe 1, c'est-à-dire PL et DM (Figure 86 et Figure 87 à gauche). L'ACM se fait sur un tableau à 6 colonnes. La Figure 89 montre que les deux trajectoires sont proches d'un modèle en "V". Un tel modèle qui peut être démontré mathématiquement (BENZECRI, 1992), est présent parce que :
    - L'axe 1 construit des correspondances entre les modalités extrêmes. Cette correspondance s'observe en particulier 1) entre *PLh* et *DMh*, à gauche, et 2) entre *PLl* et *Dml*, à droite.
    - L'axe 2 oppose les modalités intermédiaires (côté négatif) aux valeurs extrêmes. Les directions de l'axe principal étant arbitraires, le motif V est possible.

Pour résumer, pour chaque tableau, la procédure d'analyse statistique se subdivise en trois étapes :

- **Étape 1** : Le ACM, qui spécifie les colonnes et les lignes mais aussi les valeurs manquantes (AD) et les valeurs non disponibles (ND) s'il y en a.
- **Étape 2** : Réalisation des graphiques mono et bivariés.
- **Étape 3** : Réalisation des tests statistiques suivant une approche paramétrique ou non-paramétrique.

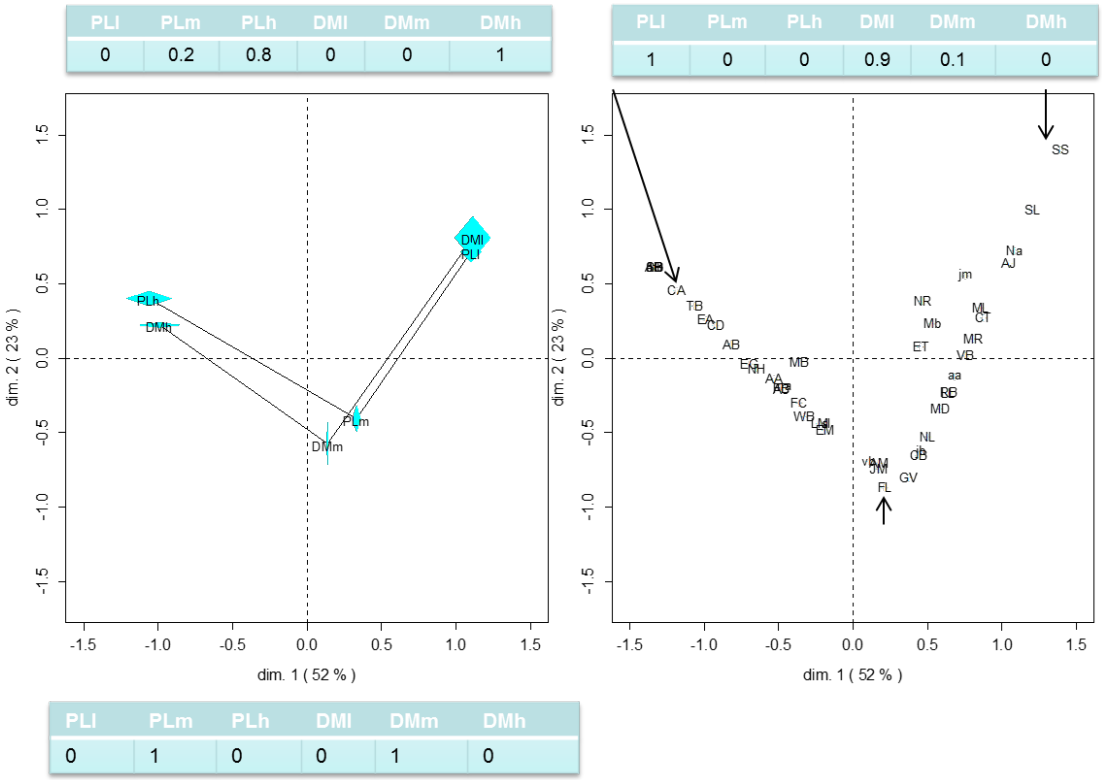


Figure 89 : Forme "V" avec l'ACM quand deux variables sont plus ou moins linéairement correlées (r=0.6). Dans un tel exemple didactique, Chacun des 45 participants est caractérisé par 6 valeurs d'appartenance (certains d'entre eux sont indiqués