



**HAL**  
open science

# Identification des marqueurs comportementaux et physiologiques capables de prédire la qualité de la reprise en main du véhicule d'une conduite autonome de niveau 3

Emilien Bonhomme

## ► To cite this version:

Emilien Bonhomme. Identification des marqueurs comportementaux et physiologiques capables de prédire la qualité de la reprise en main du véhicule d'une conduite autonome de niveau 3. Neurosciences. Université de Bordeaux, 2021. Français. NNT : 2021BORD0065 . tel-03214940

**HAL Id: tel-03214940**

**<https://theses.hal.science/tel-03214940>**

Submitted on 3 May 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE  
POUR OBTENIR LE GRADE DE  
**DOCTEUR DE**  
**L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE N°154 SCIENCES DE LA VIE ET DE LA SANTÉ  
SPÉCIALITÉ NEUROSCIENCES

Par Emilien BONHOMME

**Identification des marqueurs comportementaux et  
physiologiques capables de prédire la dangerosité de la  
reprise en main du véhicule en conduite autonome de  
niveau 3**

Sous la direction de : Pierre PHILIP

Soutenue le 19 Mars 2021

Membres du jury :

Mme LAFONT Sylviane, Directeur de recherche, Univ. Gustave Eiffel (Lyon), Rapporteur / Président  
M. VERCHER Jean-Louis, Directeur de recherche, CNRS (Marseille), Rapporteur  
Mme LESPINET-NAJIB Véronique, Maître de conférences, ENSC – Bordeaux INP, Examineur  
Mme JOFFRE Corinne, Chargé de recherche, INRAE, Examineur  
M. OJEDA Luciano, Ingénieur de recherche, Stellantis Vélizy-Villacoublay, Examineur  
M. PHILIP Pierre, Professeur des universités – praticien hospitalier, CHU Pellegrin, Directeur de thèse



# RESUME

## Identification des marqueurs comportementaux et physiologiques capables de prédire la dangerosité de la reprise en main du véhicule en conduite autonome de niveau 3

Le développement de systèmes de conduite conditionnellement automatisés est en pleine expansion. La délégation partielle de l'activité de conduite à un véhicule autonome interroge sur la capacité du conducteur à reprendre en main le véhicule lors d'une situation à risques.

L'objectif de notre travail est d'identifier des marqueurs physiologiques et comportementaux capables de prédire le temps de réponse (TOT) et la dangerosité de la reprise en main du véhicule. 32 volontaires sains ( $43 \pm 16$  ans, 16 hommes) ont effectué une conduite simulée où des événements (objet sur la voie, mauvaise météo, absence de marquage au sol) ont impliqué une reprise en main du véhicule. Avant chaque demande de reprise en main (TOR), les conducteurs réalisaient différentes tâches non liées à la conduite (NDRT) telles qu'écouter la radio, lire un livre, regarder une vidéo....

Des marqueurs électrocardiographiques (ECG), électroencéphalographiques (EEG) et oculomoteurs (OM) ont été enregistrés 2 minutes avant la reprise en main et analysés. Ces marqueurs, ainsi que l'âge, le genre, et la nature, durée des NDRTs et l'implication des mains et du regard dans les NDRTs, ont été utilisés dans nos modèles statistiques (régressions logistiques binaires, modélisations linéaires automatiques, Indice de Youden, courbes ROC).

Les reprises de conduite sont qualifiées de 4 façons. La qualification 1 (Q1) s'appuie sur le temps de collision (TTC, temps séparant le véhicule de l'obstacle à l'engagement d'un changement de voie) et la présence ou non d'une collision. La qualification 2 (Q2) reprend les 2 critères précédents et la vitesse de rotation du volant. La qualification 3 (Q3) reprend les 2 premiers critères et la vérification des rétroviseurs. Et la qualification 4 (Q4) par la présence ou non d'une collision et le franchissement de ligne (ILC).

Nos résultats démontrent que le TOT ne dépend ni de l'âge, ni du genre des conducteurs. Les TOTs les plus longs sont observés lorsque la NDRT a une forte composante manuelle ou sollicitation de la position de la tête lors de la reprise. Lors d'une reprise avec changement de voie, le TOT est le principal facteur associé à la dangerosité de cette dernière : plus le TOT est long, la reprise est dangereuse. La nature et la durée de la NDRT ne modifient pas la dangerosité de la reprise. L'âge est associé à la dangerosité de la reprise en Q2 et Q3 : les conducteurs âgés réussissent moins bien leur reprise de conduite que les plus jeunes car ils présentent un contrôle latéral du véhicule plus instable (écart-type de la vitesse de rotation du volant plus important) et une analyse de la scène moins bonne (absence de vérification rétroviseurs). En revanche, l'âge n'est pas associé au contrôle longitudinal (TTC) ou la présence de collisions. Lors d'une reprise en main sans changement de voie, c'est surtout le genre qui conditionne la dangerosité de la reprise (Q4) : les sujets du genre féminin réussissent moins bien que les sujets masculins à cause d'un plus mauvais contrôle latéral.

Aucune de nos modélisations ne permet de prédire le TOT ou la dangerosité de la reprise en Q1. L'association de paramètres OM (durées des fixations, et diamètre pupillaire) et EEG (Thêta Frontal) sont les marqueurs permettant de mieux prédire la dangerosité de la reprise en Q2. Les paramètres OM (fréquence et durée des fixations, et distance des saccades) permettent la prédiction de la dangerosité de la reprise en Q3. Des marqueurs EEG (ratio LFHF, bande Beta Haut en Cz, rapport Thêta/Beta en frontal) et OM (diamètre moyen de la pupille) associés, permettent de prédire la dangerosité de la reprise en Q4.

Nos résultats permettront dans le futur d'améliorer de nouveaux modèles (modèle de freinage, de braquage ou braquage/freinage) capables de mieux expliquer et/ou prédire le comportement du conducteur lors d'une reprise en main en conduite autonome de niveau 3.

**Mots clefs : Conduite autonome, Reprise de conduite, Tâche non liée à la conduite, Marqueurs physiologiques et comportementaux, Temps de réponse, Dangersité de la reprise de conduite**

# ABSTRACT

## **Identification of behavioral and physiological markers capable of predicting the quality of vehicle take-over in level 3 autonomous driving.**

The development of conditionally automated driving systems is expanding quickly. The partial delegation of the driving activity in an autonomous vehicle questions the driver's ability to take over the vehicle in a risky situation.

The objective of our work is to identify physiological and behavioral markers capable to predict response time (TOT) and the takeover dangerousness. 32 volunteers ( $43 \pm 16$  years 16 men) carried out simulated driving where events (object on the road, bad weather, absence of road markings) required a takeover. Before each takeover request (TOR), drivers performed various non-driving tasks (NDRT) such as listening to the radio, reading a book, watching a video...

Electrocardiographic (ECG), electroencephalographic (EEG) and oculomotor (OM) markers were recorded 2 minutes before the takeover and analyzed. These markers, age, gender and nature, duration, solicitation of the hands and gaze of NDRTs were included in our statistical models (binary logistic regressions, automatic linear models, Youden index, ROC curves).

Takeovers are qualified in 4 ways. Qualification 1 (Q1) is based on the time to collision (TTC, time separating the vehicle from the obstacle when the lane change is engaged) and the presence or absence of a collision. Qualification 2 (Q2) uses the previous 2 criteria and the velocity of the steering wheel rotation. Qualification 3 (Q3) includes the first 2 criteria and the verification of the mirrors. And qualification 4 (Q4) by the presence or not of a collision, and the inappropriate line crossing (ILC).

Our results show that TOT depends neither on age nor gender of the drivers. The longest TOTs are observed when the NDRT has a strong manual component or requires a strong solicitation of the head position during the takeover. In the case of a takeover with a lane change, the TOT is the main associated factor with the takeover dangerousness: the longer the TOT, the more dangerous the takeover. The nature and duration of the NDRT do not change the takeover dangerousness. Age is associated with the takeover dangerousness in Q2 and Q3: older drivers are less successful at takeover than younger ones because they have more unstable lateral control of the vehicle (higher standard deviation of the velocity of steering wheel rotation) and poorer analysis of the scene (lack of mirrors verification). On the other hand, age is not associated with longitudinal control (TTC) or the presence of collisions. In the case of a takeover without lane change, the takeover dangerousness (Q4) is mainly determined by gender: female subjects are less successful than male subjects because of a worse lateral control.

None of our models can predict TOT or Q1 takeover dangerousness. The combination of OM parameters (duration of fixations, and pupil diameter) and EEG (Frontal Theta) are the markers that allow better predicting of takeover dangerousness in Q2. The OM parameters (frequency and duration of fixations, and distance of saccades) allow the prediction of the takeover dangerousness in Q3. Associated EEG markers (LF/HF ratio, High Beta band in Cz, Theta / Beta ratio in frontal) and OM (mean pupil diameter), can predict the takeover dangerousness in Q4.

Our results will make it possible in the future to improve new models (braking, steering or steering / braking model) capable of better explaining and / or predicting the behavior of the driver during takeover in level 3 autonomous driving.

**Key words: autonomous driving, takeover, non-driving-related task, physiological and behavioral markers, takeover time, takeover dangerousness**

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur Pierre Philip, pour sa bienveillance, son soutien et ses conseils lors de ces trois années de thèse. Je le remercie de m'avoir proposé ce sujet de thèse, et de tout le temps passé à m'aider sur divers aspects, tel que la rédaction de ce manuscrit. Merci de m'avoir permis de rester 3 ans supplémentaires dans cette belle ville qui est Bordeaux.

Je remercie Luciano Ojeda, mon tuteur industriel de chez Stellantis, pour son suivi continu exemplaire mis en place et pour m'avoir apporté son expertise et sa bienveillance durant ces travaux de thèse. Je tiens également à le remercier pour la relecture de ce mémoire. Je tiens également remercier Clément Bougard, ingénieur de recherche travaillant également chez Stellantis, pour son suivi, ses bons conseils et sa bienveillance.

Je tiens également à remercier ma tutrice académique, Corinne Joffre. Même si nous n'avons pas eu beaucoup de contact durant ces 3 années de doctorat, m'a toujours apporté de la bienveillance et du soutien psychologique, ce qui m'a énormément réconforté.

Un énorme merci à Jacques Taillard, Ingénieur CNRS sein de la Plateforme de Recherche Neuro-PsychoPharmacologique USR 3413 SANPSY (Sommeil, Addiction et Neuropsychiatrie) pour sa proximité tout au long de cette thèse, son soutien psychologique et son aide au quotidien, que ce soit dans la réflexion, la méthodologie, la résolution des problèmes rencontrés. Et un grand merci pour m'avoir redonné confiance en moi dans les moments difficiles.

Un grand merci à Muriel Bacarisse, Cédric Valtat et Aurélien Boiseau, attachés de recherche clinique au SANPSY pour leur aide précieuse pour la gestion et la passation des sujets lors des phases expérimentales. Une mention spéciale pour Aurélien Boiseau, « sniper de fautes d'orthographe », pour la relecture de mon manuscrit.

Je tiens également à remercier mes stagiaires, Jeanne Mioche et Céline Guinet pour les travaux qu'elles ont effectués au niveau de la recherche bibliographique. Merci à William Chatelier et Pierre Esteves, pour leur aide précieuse durant les expérimentations et pour les bons moments passés au labo.

Merci à Quentin Viguier, étudiant et l'école informatique « 42 » pour ton appui en programmation python et dans l'automatisation de tâches ingrates.

Merci à tous mes collègues, Cécile Klochendler, Patricia Sagaspe, Claire Maury, Stéphanie Bioulac, Jean-Arthur Micoulaud-Franchi, Julien Coelho, Benedicte Bestieu et Benedicte Chaudruc pour votre aide et les bons moments passés avec eux durant ces 3 années.

Mes derniers remerciements vont à ma compagne, Manon Lavalley, ma famille et tous mes amis pour m'avoir supporté, et apporté soutien, réconfort et motivation tout au long de ce doctorat.

Pour finir je dédie ces travaux de thèse à mon papa, qui a toujours été là pour moi et qui est parti bien trop vite durant cette thèse. J'aurai tellement aimé te présenter tout ce que j'ai fait durant ces 3 ans. En espérant ne pas être prétentieux, je pense que tu aurais été très fier de ton fils.

## AVANT-PROPOS

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'une Convention CIFRE « Convention Industrielle de Formation par la Recherche ». Elle a été réalisée au sein de la Plateforme de Recherche Neuro-PsychoPharmacologique USR 3413 SANPSY (Sommeil Addiction et Neuropsychiatrie), pour le côté académique et, au sein de la DRIA (Direction de la Recherche et de l'Ingénierie Avancée) de Stellantis, pour le côté industriel. Cette thèse couvrant une collaboration entre le laboratoire SANPSY et Stellantis entre dans le cadre de l'OpenLab « Electronics and Systems for Automotive ».

Les travaux ont été effectués sous la direction de Pierre Philip, Directeur de SANPSY, Professeur à l'Université de Bordeaux et Praticien Hospitalier au sein de l'Hôpital Pellegrin à Bordeaux, co-encadrés par Jacques Taillard, ingénieur de recherche au CNRS, et sous la responsabilité en entreprise de Luciano Ojeda, ergonomiste au sein de la DRIA du Groupe Stellantis.

Dans les parties suivant cet avant-propos, nous ne parlerons pas de qualité de la reprise mais de dangerosité de la reprise. Bien que les différentes références mentionnées dans ce manuscrit utilisent le terme de « Qualité de la reprise », nous estimons dans le cadre de nos travaux et à partir du Chapitre 2:, la dangerosité de la reprise paraît mieux appropriée pour qualifier la reprise de conduite du conducteur.

# SOMMAIRE

RESUME .....	3
ABSTRACT .....	5
REMERCIEMENTS.....	7
AVANT-PROPOS .....	8
SOMMAIRE .....	9
GLOSSAIRE .....	13
LISTE DES ABREVIATIONS .....	14
LISTE DES FIGURES .....	16
LISTE DES TABLEAUX.....	19
TABLE DES ANNEXES.....	23
<b>CHAPITRE 0: INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>25</b>
1. <i>Contexte général</i> .....	27
2. <i>Organisation du manuscrit</i> .....	29
<b>CHAPITRE 1: CONTEXTE THEORIQUE .....</b>	<b>31</b>
1. <i>Activité de conduite</i> .....	33
1.1. Définition de l'activité de conduite manuelle.....	33
1.2. Le modèle SRK (Skills-Rules-Knowledge) .....	33
1.3. Modèle de Michon .....	34
2. <i>Transition vers l'automatisation de la conduite</i> .....	36
2.1. La classification des niveaux de conduite automatisée .....	36
3. <i>Concept du « Out of the Loop » (en dehors de la boucle)</i> .....	38
4. <i>Performance de la reprise en main</i> .....	40
4.1. Processus moteur visuel cognitif lors de la reprise en main.....	40
4.2. Temps de réponse .....	41
4.2.1. Définition et état des lieux .....	41
4.2.2. Variables associées Temps de réponse (TOT).....	42
4.2.2.1. Le temps disponible .....	42
4.2.2.2. La tâche non liée à la conduite (Non Driving Related Task) .....	42
4.2.2.3. Le type d'alertes pour la demande de reprise en main (TOR).....	43
4.2.2.4. L'environnement de conduite.....	43
4.2.2.5. Les facteurs humains du conducteur .....	43
4.3. Qualité de la reprise .....	44
4.3.1. Définition et état des lieux .....	44
4.4. Modèles de comportement des conducteurs lors d'une reprise en main en conduite autonome .....	45
4.4.1. Modèle prenant en compte le freinage .....	45
4.4.2. Modèle de changement de voie ou d'évitement .....	45
4.4.3. Modèle de freinage et d'évitement .....	46
4.4.4. Modèles dans le cadre de la conduite autonome .....	46
5. <i>Paramètres physiologiques et performance de la reprise en main</i> .....	47
5.1. L'activité cardiaque.....	47
5.1.1. Le fonctionnement du cœur.....	47
5.1.2. Indicateurs temporels de l'activité cardiaque .....	48
5.1.3. Indicateurs fréquentiels de l'activité cardiaque .....	49
5.1.4. Indicateurs géométriques de l'activité cardiaque .....	49
5.2. L'électroencéphalogramme.....	50
5.3. Oculométrie (OM) .....	51
5.3.1. Prise en compte des saccades oculaires.....	52
5.3.2. Prise en compte du temps de fixation.....	53
5.3.3. Prise en compte de la dilatation de la pupille .....	53
6. <i>Hypothèse et objectifs</i> .....	54
<b>CHAPITRE 2: METHODE .....</b>	<b>55</b>

1. Population étudiée.....	57
2. Design de l'étude .....	58
2.1. Déroulement de l'étude .....	58
3. Outils de simulation .....	61
3.1. Le simulateur de conduite .....	61
3.2. Le poste de contrôle .....	61
4. Conception des scénarii de conduite.....	63
4.1. Cartographie de la conduite .....	63
4.2. Environnement de développement (SCANer Studio) .....	63
4.3. Rédaction des scénarii .....	63
4.4. Les évènements.....	64
4.5. Le trafic routier .....	64
4.6. La voix du simulateur de conduite.....	65
4.7. Interaction avec la tablette et communication .....	65
4.8. Aménagements liés au contexte du mal du simulateur .....	65
5. Synchronisation des enregistrements des différents paramètres.....	67
5.1. Principe de fonctionnement .....	67
5.2. Synchronisation et acquisition des enregistrements des données de performances de conduite et des paramètres physiologiques .....	68
5.2.1. Données de performances de conduite (CAN) .....	68
5.2.2. Électrocardiogramme .....	70
5.2.3. Électroencéphalogramme .....	71
5.2.4. Eye-Tracking .....	72
6. Prétraitement des données.....	74
6.1. Isolement et uniformisation des données de reprise en main .....	74
6.2. Activité cérébrale (EEG) .....	75
6.3. L'activité cardiaque (ECG).....	77
6.3.1. Eye-Tracking (OM).....	78
6.4. Validation des enregistrements.....	79
6.4.1. Variables de performances .....	79
6.4.1.1. Signaux de vitesse .....	79
6.4.1.2. Signaux de freinage .....	80
6.4.1.3. Signaux de vitesse de rotation du volant .....	81
6.4.1.4. Signaux de trajectoire du véhicule .....	81
6.4.2. Signaux liés à la l'activité cardiaque .....	82
6.4.3. Signaux liés à l'activité cérébrale.....	82
6.4.4. Eye-Tracking .....	83
7. Statistiques .....	85
7.1. La qualification de la reprise de conduite.....	85
7.1.1. Les critères de qualifications .....	85
7.1.2. La qualification de la reprise .....	86
7.2. La classification des variables .....	86
7.3. Analyses de prédiction du temps de réponse (TOT).....	87
7.4. Prédiction de la dangerosité de la reprise .....	88
7.5. Critères et méthode d'interprétation des résultats.....	88
7.6. Exclusion des données biaisées .....	90
<b>CHAPITRE 3: RESULTATS.....</b>	<b>91</b>
1. Association des variables avec le TOT.....	93
1.1. L'âge et le genre .....	93
1.2. Variables relatives à la NDRT et l'évènement .....	93
1.3. Variables relatives à l'activité cardiaque (ECG) .....	94
1.4. Variables relatives à l'activité cérébrale (EEG) .....	96
1.5. Variables relatives à l'activité oculomotrice (Eye-Tracking -OM) .....	97
2. Association des variables sur la dangerosité de la reprise de conduite .....	99
2.1. A travers la qualification 1 de la reprise .....	99
2.1.1. Age, genre, tâches non liées à la conduite et évènements .....	99
2.1.2. Activité cardiaque (ECG).....	100

2.1.3. Activité cérébrale (EEG).....	101
2.1.4. Activité oculomotrice (Eye-Tracking - OM) .....	101
2.2. A travers la qualification 2 de la reprise .....	102
2.2.1. Age, genre, NDRT et évènements .....	102
2.2.2. Activité cardiaque (ECG).....	104
2.2.3. Activité cérébrale (EEG).....	104
2.2.4. Activité oculomotrice (Eye-Tracking - OM) .....	105
2.3. A travers la qualification 3 de la reprise .....	106
2.3.1. Age, genre, NDRT et évènements .....	106
2.3.2. Activité cardiaque (ECG).....	107
2.3.3. Activité cérébrale (EEG).....	108
2.3.4. Activité oculomotrice (Eye-Tracking – OM).....	109
2.4. A travers la qualification 4 de la reprise .....	109
2.4.1. Age, genre, NDRT et Évènements.....	109
2.4.2. Activité cardiaque (ECG).....	111
2.4.3. Activité cérébrale (EEG).....	112
2.4.4. Activité oculomotrice (Eye-Tracking – OM).....	112
<b>3. Prédiction du Temps de réponse (TOT) .....</b>	<b>114</b>
3.1. Prédiction du TOT en prenant compte de l'âge, du genre, de la NDRT et de l'évènement .....	114
3.2. Prédiction du TOT avec données brutes de l'ECG.....	114
3.3. Prédiction du TOT en prenant compte de l'ECG comparées à la Baseline (% Évolution) .....	115
3.4. Prédiction du TOT en prenant compte des données brutes de l'EEG.....	115
3.5. Prédiction du TOT en prenant compte des données de l'EEG comparées à la Baseline (% Évolution) .....	115
3.6. Prédiction du TOT en prenant compte des données brutes de l'Eye-Tracking.....	116
3.7. Prédiction du TOT en prenant compte des données de l'OM comparées à la Baseline (% Évolution) .....	116
<b>4. Prédiction de la dangerosité de la reprise de conduite.....</b>	<b>117</b>
4.1. Qualification 1 .....	117
4.1.1. Age, genre, NDRT et évènements (N = 220) .....	117
4.1.2. Données brutes de l'ECG (N = 199) .....	117
4.1.3. ECG comparée à la Baseline (N = 199).....	118
4.1.4. Données brutes de l'EEG (N = 168) .....	118
4.1.5. EEG comparée à la Baseline (N = 168).....	118
4.1.6. Données brutes de l'OM (N = 99).....	118
4.1.7. OM comparée à la Baseline (N = 99) .....	119
4.1.8. Données brutes de l'OM, EEG et ECG (N = 76) .....	120
4.1.9. Données de l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 76) .....	120
4.1.10. Données brutes de l'EEG et ECG (N = 165).....	120
4.1.11. EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 165).....	121
4.2. Qualification 2 .....	122
4.2.1. Age, genre, NDRT et évènements (N = 220) .....	122
4.2.2. Données brutes de l'ECG (N = 210) .....	122
4.2.3. ECG comparée à la Baseline (N = 209).....	123
4.2.4. Données brutes de l'EEG (N = 168) .....	124
4.2.5. EEG comparée à la Baseline (N = 169).....	125
4.2.6. Données brutes de l'OM (N = 99).....	126
4.2.7. OM comparée à la Baseline (N = 99) .....	127
4.2.8. Données brutes de l'OM, EEG et ECG (N = 71) .....	128
4.2.9. Données de l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 72) .....	130
4.2.10. Données brutes de l'EEG et ECG (N = 161).....	131
4.2.11. EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 164).....	132
4.3. Qualification 3 .....	134
4.3.1. Age, genre, NDRT et évènements (N = 220) .....	134
4.3.2. Données brutes de l'ECG (N = 210) .....	134
4.3.3. ECG comparée à la Baseline (N = 210).....	135
4.3.4. Données brutes de l'EEG (N = 170) .....	136
4.3.5. EEG comparée à la Baseline (N = 170).....	137
4.3.6. Données brutes de l'OM (N = 99).....	137
4.3.7. OM comparée à la Baseline (N = 99) .....	138

4.3.8. Données brutes de l'OM, EEG et ECG (N = 71) .....	139
4.3.9. Données de l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 72) .....	140
4.3.10. Données brutes de l'EEG et ECG (N = 165) .....	141
4.3.11. EEG et ECG comparée à la Baseline (N = 165) .....	142
4.4. Qualification 4 .....	144
4.4.1. Age, genre, NDRT et évènements (N = 119) .....	144
4.4.2. Données brutes de l'ECG (N = 112) .....	144
4.4.3. ECG comparée à la Baseline (N = 112).....	145
4.4.4. Données brutes de l'EEG (N = 89) .....	146
4.4.5. EEG comparée à la Baseline (N = 89).....	147
4.4.6. Données brutes de l'OM (N = 50).....	147
4.4.7. OM comparée à la Baseline (N = 50) .....	148
4.4.8. Données brutes de l'OM, EEG et ECG (N = 40) .....	149
4.4.9. Données de l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 40) .....	150
4.4.10. Données brutes de l'EEG et ECG (N = 87) .....	151
4.4.11. EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 87).....	152
<b>CHAPITRE 4: DISCUSSION GENERALE .....</b>	<b>155</b>
1. <i>Synthèse des résultats de l'analyse statistique</i> .....	157
1.1. Les variables associées au temps de réponse (TOT) .....	157
1.2. Les modèles les plus performants pour la prédiction du TOT .....	158
1.3. Les variables associées à la dangerosité de la reprise .....	158
1.4. Les modèles les plus performants pour la prédiction de la dangerosité de la reprise de conduite .....	159
2. <i>Discussion</i> .....	160
2.1. Le temps de réponse (TOT).....	160
2.2. La dangerosité de la reprise.....	161
2.2.1. Dangerosité de la reprise lors d'un changement de voie imposé .....	162
2.2.2. Dangerosité de la reprise sans changement de voie imposé .....	164
3. <i>Limites</i> .....	165
<b>CHAPITRE 5: CONCLUSION .....</b>	<b>167</b>
BIBLIOGRAPHIE .....	171
ANNEXES .....	181
Annexe 1: Évaluation des troubles du sommeil .....	181
Annexe 2: Évaluation de la qualité de sommeil sur les 3 derniers mois .....	182
Annexe 3: Évaluation de la détresse psychologique (9 échelles) .....	188
Annexe 4: Évaluation des fonctions cognitives et de la capacité mnésique .....	192
Annexe 5: Évaluation du mal du simulateur (Simulator Sickness) .....	196

## GLOSSAIRE

Epworth : Échelle de somnolence

Khi<sup>2</sup> : Test vérifiant l'indépendance entre deux variables catégorielles

T-Test : Test statistique comparant les moyennes de deux groupes d'échantillons et vérifiant si ces moyennes sont significativement différentes au point de vue statistique

Intervalle RR : Temps entre deux battements cardiaques détectés

Intervalle NN : Intervalle RR avec un filtrage supplémentaire pour supprimer les artefacts et le bruit

## LISTE DES ABREVIATIONS

ADAS : Aides à la conduite (Advanced Driver-Assistance Systems)

ALM : Modélisation Linéaire Automatique (Automatic Linear Modeling)

ANOVA : Analyse de Variance (ANalysis Of VAriance)

AUC : Aire sous la courbe (courbe ROC)

BHAPI : Biopac Hardware API License

BNSQ : Basic Nordic Sleep Questionnaire

CAN : Controller Area Network

CPP : Comité de Protection des Personnes

ECG : Activité ElectroCardioGraphique

EEG : Activité ElectroEncéphaloGraphique

FC : Fréquence Cardiaque

HF : Haute fréquence des battements du cœur (0.15 à 0.4 Hz – High Frequency)

HRV : Variabilité cardiaque (Heart Rate Variability)

IHM : Interface Homme-Machine

ILC : Franchissement inapproprié de ligne (Inappropriate Line Crossing)

IMC : Indice de Masse Corporelle

LF : Basse fréquence des battements du cœur (0.04 à 0.15 Hz – Low Frequency)

LFHF : Ratio basse fréquence/haute fréquence des battements du cœur

LiDAR : Détection et estimation de la distance par la lumière (Light Detection And Ranging)

Mean RR : Moyenne des intervalles RR

MMSE : Mini Mental State Examination

MRRHRV : Médiane de la Variabilité de la fréquence cardiaque basée sur les intervalles RR relatifs

NDRT : Tâche non liée à la conduite (Non-Driving-Related Task)

NHTSA : National Highway Traffic Safety Administration

ODD : concept de « Contexte Opérationnel » (Operational Design Domain)

OM : Activité Oculomotrice

OOTL : En dehors de la boucle (Out Of The Loop)

PNN50 : Pourcentage de différences > 50 ms entre les intervalles NN successifs

Q1 : Qualification 1 de la dangerosité de la reprise de conduite

Q2 : Qualification 2 de la dangerosité de la reprise de conduite

Q3 : Qualification 3 de la dangerosité de la reprise de conduite

Q4 : Qualification 4 de la dangerosité de la reprise de conduite

RMSSD : Moyenne quadratique des différences successives de la fréquence cardiaque (Root Mean Square of Successive Differences)

ROC (courbe) : caractéristique de fonctionnement du récepteur (Receiver Operating Characteristic)

SAE : Society of Automotive Engineers

SANPSY : Sommeil Attention NeuroPSYchiatry (Plateforme de recherche)

SCL-90-R : Symptom Checklist-90 items-Revised

SD1 : Écart -type de la variabilité à court terme de l'intervalle RR (diagramme de Poincaré)

SD1/SD2 : Ratio court terme/long terme de la fréquence cardiaque

SD2 : Écart type de la variabilité à long terme de l'intervalle RR (diagramme de Poincaré)

SDNN : Standard Deviation of NN intervals (Écart -type des intervalles NN)

SSQ : Simulator Sickness Questionnaire

SuRT : The Surrogate Reference Task

TB : Time Budget

TDAH : Trouble du Déficit de l'Attention avec ou sans Hyperactivité

TINN : Interpolation Triangulaire d'histogramme des intervalles NN

TOR : Alerte de demande de reprise de conduite (TakeOver Request)

TOT : temps de réponse ou temps de reprise en main du véhicule (TakeOver Time)

TTC : temps séparant le véhicule de l'obstacle à l'engagement d'un changement de voie (Temps de Time To Collision).

TRI : Index Triangulaire de l'histogramme des intervalles NN

V0 : Visite d'inclusion de l'étude ANTIDOTE

V1 : Visite expérimentale de l'étude ANTIDOTE

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation du contrôle par les connaissances, les règles et les compétences selon Rasmussen (1983) .....	34
Figure 2 : Représentation des niveaux stratégique, tactique et opérationnel selon Michon (1985) ...	35
Figure 3 : Classification des niveaux d'autonomie d'un véhicule selon SAE International (Society of Automotive Engineers).....	36
Figure 4 : Présentation des tâches ou fonctions de contrôle hiérarchique multi-niveaux de la conduite. (Merat et al., 2019). .....	38
Figure 5 : Modèle du processus de transition de la conduite automatisée au contrôle manuel (Marberger et al., 2017) .....	40
Figure 6 : Anatomie du cœur.....	47
Figure 7 Représentation graphique des différentes ondes enregistrées par un ECG .....	48
Figure 8 : Les différentes ondes de l'activité cérébrale .....	50
Figure 9 : Les différents évènements composant les deux scénarii de conduite (1 - Travaux, 2 - Obstacle, 3- Accident, 4 - Absence de marquage au sol, 5 Conditions météorologiques difficiles). ....	59
Figure 10 : Chronologie des évènements du scénario 1 - 40minutes .....	60
Figure 11 : Chronologie des évènements du scénario 2 - 60minutes .....	60
Figure 12 : Simulateur de conduite, vue intérieure et extérieure (Peugeot 2008).....	61
Figure 13 : Vue globale de la salle de contrôle du simulateur de conduite (matériel mis en place pour l'enregistrements des paramètres physiologiques et comportementaux et celui des performances de conduite). .....	62
Figure 14 : Boucle d'autoroute et l'environnement de conduite. ....	63
Figure 15 : Aperçu du script du scénario (durée 40 minutes) représentant la procédure de reprise et de délégation de la conduite.....	64
Figure 16 : Utilité de la méthode du mapping. L'image de gauche montre l'affichage brut et déformé sur le mur de projection. L'image de droite montre l'affichage adapté à la forme du mur de projection grâce au mapping. ....	66
Figure 17 : Architecture générale de l'acquisition synchronisée des données CAN, ECG, Eyetracking et EEG. ....	68
Figure 18 : Diagramme d'acquisition des données CAN sur RTMaps .....	69
Figure 19 : Fichier de configuration.....	70
Figure 20 : Diagramme d'acquisition des données de l'ECG sur RTMaps.....	71
Figure 21 : Propriétés du composant Biopac_MP150_MP_160 .....	71
Figure 22 : Diagramme d'acquisition des données de l'EEG sous OpenViBE et RTMaps.....	72
Figure 23 : Diagramme d'import de RTMaps des données de l'EEG acquises par OpenViBE.....	72
Figure 24 : Diagramme d'acquisition des données du Pupil Core sur RTMaps.....	73
Figure 25 : Interface du programme python.....	74
Figure 26 : Architecture de sortie de fichiers découpés .....	75
Figure 27 : Sélection (en vert) des électrodes de l'EEG : F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4, O1, Oz, O2, TP9, TP10.....	75
Figure 28 : Exemple de suppression des artéfacts sur les signaux de l'EEG. A gauche, les signaux bruts enregistrés et à droite, ces mêmes signaux traités, avec suppression des artéfacts (boundary). ....	76
Figure 29 : Interface graphique de HRVTool, logiciel d'extraction de variables d'intérêt de la variabilité cardiaque. La partie supérieure : graphique représentant des intervalles RR avec des options d'étiquetage, de filtrage et d'affichage. La partie centrale : à gauche sont calculés les paramètres extraits de la variabilité cardiaque. Au centre, se trouve un graphique des intervalles successifs. A droite, la variabilité cardiaque est représentée à travers un tachogramme et un	

spectrogramme. Dans le panneau inférieur, à gauche se trouve la séquence chronologique des fréquences cardiaques et des paramètres locaux de la variabilité cardiaque. À droite, et à droite, le diagramme de Poincaré représenté par un nuage de points de tous les intervalles RR (prédécesseur vs successeur).....	77
Figure 30 : Signaux de performance de tous les sujets, par variables et par reprise en main .....	80
Figure 31 : A gauche, le tachogramme d'un signal ECG brut (sans filtrage). A droite, le tachogramme de ce même signal, filtré de tout artéfact.....	82
Figure 32 : Graphiques de Poincaré. A gauche avant : représentation du signal ECG brut (points orange représentant les artefacts. A droite, représentation du signal ECG filtré .....	82
Figure 33 : Exemple de signaux EEG enregistré durant la tâche non liée à la conduite MANGER. Les zones surlignées en cyan représentent les artéfacts générés par la mastication.....	83
Figure 34 : Détection des marqueurs des AOIs des 3 rétroviseurs et la de tablette avec les indices de confiance de la détection. ....	83
Figure 35 : Interprétation de la courbe ROC .....	89
Figure 36 : Courbes ROC des variables, du genre et de l'ECG brute retenues dans le modèle de prédiction de Q1.....	118
Figure 37 : Courbe ROC de la variable de la OM comparée à la Baseline retenue dans le modèle de prédiction de Q1.....	119
Figure 38 : Courbes ROC des variables de l'âge et du genre retenues dans le modèle de prédiction de Q1. ....	121
Figure 39 : Courbes ROC des variables de l'âge, et de l'ECG brute retenues dans le modèle de prédiction de Q2.....	123
Figure 40 : Courbes ROC des variables de l'ECG comparée à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q2.....	124
Figure 41 : Courbes ROC des variables de l'EEG brute retenues dans le modèle de prédiction de Q2. ....	125
Figure 42 : Courbes ROC des variables de l'âge et de l'EEG comparée à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q2.....	126
Figure 43 : Courbes ROC des variables de l'âge et de l'OM brute retenues dans le modèle de prédiction de Q2.....	127
Figure 44 : Courbes ROC des variables de l'âge et de l'OM comparée à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q2. ....	128
Figure 45 : Courbes ROC des variables de l'EEG et de l'OM brutes retenues dans le modèle de prédiction de Q2.....	129
Figure 46 : Courbes ROC des variables de l'âge, de l'EEG et ECG comparées à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q2. ....	130
Figure 47 : Courbes ROC des variables de l'EEG et ECG brutes retenues dans le modèle de prédiction de Q2. ....	132
Figure 48 : Courbes ROC des variables de l'âge, de l'EEG et ECG comparées à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q2. ....	133
Figure 49 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de l'ECG brute retenues dans le modèle de prédiction de Q3.....	135
Figure 50 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de l'ECG comparée à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q3 et le score de la sensibilité, de la spécificité et l'indice de Youden du modèle. ....	136
Figure 51 : Courbes ROC des variables de l'âge et du genre retenues dans le modèle de prédiction de Q3. ....	137

Figure 52 : Courbes ROC des variables de l'âge et de la OM brute retenues dans le modèle de prédiction de Q3.....	138
Figure 53 : Courbe ROC de la variable de l'âge, retenue dans le modèle de prédiction de Q3.....	139
Figure 54 : Courbes ROC des variables de l'âge et l'OM brute retenues dans le modèle de prédiction de Q3. ....	140
Figure 55 : Courbe ROC de la variable de l'âge retenue dans le modèle de prédiction de Q3.....	141
Figure 56 : Courbe ROC de la variable de l'âge retenue dans le modèle de prédiction de Q3.....	142
Figure 57 : Courbe ROC de la variable de l'âge retenue dans le modèle de prédiction de Q3.....	143
Figure 58 : Courbe ROC des variables de l'âge, du genre retenues dans le modèle de prédiction de Q4. ....	145
Figure 59 : Courbe ROC des variables de l'âge et du genre retenues dans le modèle de prédiction de Q4 .....	146
Figure 60 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de l'EEG brute retenues dans le modèle de prédiction de Q4 et le score de la sensibilité, de la spécificité et l'indice de Youden du modèle. ....	147
Figure 61 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de la OM brute retenues dans le modèle de prédiction de Q4.....	148
Figure 62 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de la OM comparée à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q4. ....	149
Figure 63 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de la OM, EEG et ECG brutes retenues dans le modèle de prédiction de Q4. ....	150
Figure 64 : Courbes ROC des variables du genre et de l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q4.....	151
Figure 65 : Courbes ROC des variables du genre et de l'EEG et ECG brutes retenues dans le modèle de prédiction de Q4.....	152
Figure 66 : Courbes ROC des variables de l'âge retenues dans le modèle de prédiction de Q4. ....	153

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : TOTs moyens $\pm$ écart types en fonction de l'âge (numérique et catégorisé) et du genre.	93
Tableau 2 : TOTs moyens $\pm$ écart types en fonction des tâches distractives (nature, durées catégorisées, sollicitation du regard, implication des mains) des évènements (nature et type de manœuvre : changement de voie ou maintien dans la voie).....	94
Tableau 3 : Association des variables de l'activité cardiaque au TOT, pour les reprises avec et sans changement de voie en fonction des données bruts et comparées à la Baseline.....	95
Tableau 4 : Association des variables de l'activité cérébrale au TOT, pour les reprises en main avec et sans changement de voie en fonction des signaux absolus et comparées à la Baseline.....	96
Tableau 5 : Association des variables de l'oculométrie au TOT.....	98
Tableau 6 : Qualification 1 - TOT, âge et durée de la NDRT en fonction de la dangerosité de la reprise (Moyenne $\pm$ écart type).....	99
Tableau 7 : Qualification 1 - Pourcentage de reprises dangereuses en fonction de l'âge catégorisé, du genre, des NDRT (nature, durée catégorisée, sollicitation du regard, implication des mains) et de la nature de l'évènement.....	100
Tableau 8 : Association des variables extraites de l'activité cardiaque à Q1.....	100
Tableau 9 : Association des variables de l'activité cérébrale à Q1.....	101
Tableau 10 : Association des variables de l'oculométrie à Q1.....	102
Tableau 11 : TOT, âge et durée de la NDRT en fonction de la dangerosité de la reprise (Moyenne $\pm$ écart type).....	103
Tableau 12 : Pourcentage de reprises dangereuses en fonction de l'âge catégorisé, du genre, des NDRT (nature, durée catégorisée, sollicitation du regard, implication des mains) de la nature de l'évènement.....	103
Tableau 13 : Association des variables extraites de l'activité cardiaque à Q2.....	104
Tableau 14 : Association des variables de l'activité cérébrale à Q2.....	105
Tableau 15 : Association des variables de l'oculométrie à Q2.....	105
Tableau 16 : TOT, âge et durée de la NDRT en fonction de la dangerosité de la reprise (Moyenne $\pm$ écart type).....	106
Tableau 17 : Pourcentage de reprises dangereuses en fonction de l'âge catégorisé, du genre, des NDRT (nature, durée catégorisée, sollicitation du regard, implication des mains) de la nature de l'évènement.....	107
Tableau 18 : Association des variables extraites de la l'activité cardiaque à Q3.....	108
Tableau 19 : Association des variables de l'activité cérébrale à Q3.....	108
Tableau 20 : Association des variables de l'oculométrie à Q3.....	109
Tableau 21 : Pourcentage de reprise dangereuses en fonction de l'âge catégorisé, du genre, des NDRT (nature, durée catégorisée, sollicitation du regard, implication des mains) de la nature de l'évènement.....	110
Tableau 22 : TOT, âge et durée de la NDRT en fonction de la dangerosité de la reprise (Moyenne $\pm$ écart type).....	111
Tableau 23 : Association des variables extraites de la variabilité cardiaque à Q4.....	111
Tableau 24 : Association des variables de l'activité cérébrale à Q4.....	112
Tableau 25 : Association des variables de l'oculométrie à Q4.....	112
Tableau 26 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers la nature de l'évènement, en prenant en compte Q1. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).....	117

Tableau 27 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers les données de l'ECG brutes, en prenant en compte Q1. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).....	118
Tableau 28 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers la OM comparée à la Baseline, en prenant en compte Q1. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).....	119
Tableau 29 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et le genre, en prenant en compte Q1. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).....	120
Tableau 30 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et la nature de l'évènement, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).....	122
Tableau 31 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'ECG brute, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	123
Tableau 32 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'ECG comparée à la Baseline, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).....	124
Tableau 33 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG brute, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	125
Tableau 34 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG comparée à la Baseline, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).....	126
Tableau 35 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers OM brute, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	127
Tableau 36 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers OM comparée à la Baseline, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).....	128
Tableau 37 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'OM, EEG et ECG brutes, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).....	129
Tableau 38 0. : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers OM, EEG et ECG comparées à la Baseline, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	130
Tableau 39 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG et ECG brutes, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).....	131
Tableau 40 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG et ECG comparées à la Baseline, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).....	132
Tableau 41 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge, le genre et la nature de l'évènement, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	134
Tableau 42 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'ECG brute, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	135

Tableau 43 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'ECG comparée à la Baseline, en prenant en compte Q3. ....	135
Tableau 44 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG brute, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	136
Tableau 45 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'OM Brute, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	138
Tableau 46 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'OM comparée à la Baseline, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	139
Tableau 47 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers la OM, EEG et ECG brute, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	140
Tableau 48 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers la OM, EEG et ECG comparée à la Baseline, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	141
Tableau 49 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG et ECG brutes, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	142
Tableau 50 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge, le genre et l'ECG comparée à la Baseline, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	143
Tableau 51 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et le genre, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	144
Tableau 52 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et le genre, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	145
Tableau 53 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et le genre, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	145
Tableau 54 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG brute, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	146
Tableau 55 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers le genre et l'OM brute, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	147
Tableau 56 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et le genre, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	148
Tableau 57 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers la l'âge et le genre, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	149
Tableau 58 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers le genre, l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). ....	150

Tableau 59 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG et ECG brutes en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). .....	151
Tableau 60 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden). .....	152

## TABLE DES ANNEXES

Annexe 1:	Évaluation des troubles du sommeil .....	181
Annexe 2:	Évaluation de la qualité de sommeil sur les 3 derniers mois .....	182
Annexe 3:	Évaluation de la détresse psychologique (9 échelles) .....	188
Annexe 4:	Évaluation des fonctions cognitives et de la capacité mnésique .....	192
Annexe 5:	Évaluation du mal du simulateur (Simulator Sickness) .....	196



## **CHAPITRE 0: INTRODUCTION GENERALE**



# 1. Contexte général

L'automatisation de la conduite automobile est une des transformations majeures de l'automobile et elle est inscrite à niveau national au plan de la Nouvelle France Industrielle (NFI), mais sa réalité est mondiale.

L'activité de conduite automobile va être bouleversée. L'automatisation autorisée par le système va jouer un rôle dans la libération des ressources attentionnelles du conducteur ? Ces ressources pourront être allouées à la réalisation de tâches non liées à la conduite et/ou à la supervision de l'évolution du véhicule sur le réseau routier. Cette libération des ressources allouées est propice à une amélioration de la sécurité du conducteur, la conduite manuelle étant extrêmement coûteuse en matière de ressources attentionnelles. En effet, le conducteur manuel serait responsable de 90% des accidents de la route (Albright et al., 2015), principalement par cause de la distraction et de la somnolence liées à la vitesse et à l'infrastructure. Ainsi, un des intérêts majeurs de l'automatisation des véhicules est de limiter les accidents liés aux facteurs accidentogènes que sont la distraction et la somnolence. Cette automatisation, permettra une libération de temps au conducteur et ce dernier pourra être amené à réaliser des tâches non liées à la conduite au sein du véhicule. Cependant, la réalisation d'une activité hors conduite automobile pendant l'évolution autonome du véhicule sur le réseau routier, fait l'objet de nombreuses interrogations.

Effectivement, au niveau 3 de conduite automatisée, le conducteur doit être disponible pour reprendre la conduite en cas de besoin c'est-à-dire, entre autres, lors de défaillance du système ou lors de l'intervention de conditions non gérés par le système autonome (Operational Design Domain (ODD)). Ces situations à risques, appelant des ressources humaines parfois non disponibles car mobilisés sur des tâches non liées à la conduite, interrogent la capacité du conducteur, à répondre, dans un intervalle de temps très court, à la demande de reprise en main du système, alors même que ses ressources attentionnelles peuvent être allouées à la réalisation d'une tâche non liée à la conduite.

A ce propos, l'apport théorique et les données quantitatives des travaux présentés, pourront guider la conception d'un système de monitoring de l'activité physiologique du sujet. Cet outil constituerait un des leviers de la prévention des accidents dans le cadre de la conduite autonome. Il aurait pour objectif de prédire la dangerosité de la reprise en main du véhicule, sur la base des signaux physiologiques détectés chez le conducteur, avant la demande de reprise en main du système autonome.

Cet outil de prédiction semble essentiel et pour cause, alors que la certification actuelle en matière de management des sécurités au sein des systèmes automobiles assure une certaine sécurité face aux défaillances fonctionnelles d'un système automatisé, cette norme automobile (ISO 26262) traite essentiellement des problématiques associées aux matériaux automobiles et aux déviations systématiques des logiciels (Tlig et al., 2018). Elle ne fournit aucune piste aux entreprises pour gérer les problématiques d'interactions humaines et de perception environnementale, lors de la phase de conception des véhicules.

Les recherches actuelles ont permis de définir plusieurs notions critiques et essentielles à la compréhension des enjeux qui impliquent le facteur humain dans la gestion d'un système de conduite autonome. Melcher (Melcher et al., 2015), définit le TOR (Take Over Request), correspondant à l'alerte du système autonome suite à la détection d'un événement non planifié par le système tels qu'un accident de la route ou encore une zone de travaux (sortie de l'ODD). Gold évoque le Time Budget (TB) (Gold et al., 2017), comme étant le temps qui sépare le TOR et l'objet entraînant la requête de reprise en main par le système (obstacle, absence de marquage). A vitesse régulière avant l'alerte du système,

le Time To Collision (TTC) est calculé comme étant le temps entre le moment de la reprise en main du véhicule et l'impact du système autonome (Sportillo et al., 2018). La tâche non liée à la conduite (NDRT), a été définie par Körber (Körber and Bengler, 2018). Il s'agit de la tâche réalisée par le conducteur pendant l'automatisation de la conduite. Enfin, le temps de reprise en main du véhicule (TOT, TakeOver Time) peut être défini comme le temps entre la demande de reprise en main par le système autonome (TOR) et la désactivation du système par le conducteur.

Afin de mettre en lumière les différents paramètres physiologiques et comportementaux qui permettent de prédire la dangerosité de la reprise en main d'un véhicule autonome de niveau 3, nous avons testé l'impact de différentes tâches non liées à la conduite sur la dangerosité de la reprise en main d'un véhicule autonome (qualités réactives et performances). Plus précisément, nous allons examiner si la demande physiologique de la NDRT est associée à la phase de reprise en main du véhicule, lors de l'apparition d'un événement imposant un réengagement dans la tâche de conduite. Pour expliquer les différentes notions et concepts évoqués par ce sujet, nous allons commencer par comprendre les enjeux associés aux véhicules autonomes. Les concepts phares et les relations entre les caractéristiques humaines et l'utilisation d'un système automatisé seront explicités. Les paramètres physiologiques et comportementaux du conducteur seront étudiés afin d'identifier les marqueurs qui ont été décelés précédemment, au sein des recherches dans le domaine. Il s'agira ensuite d'explorer si la tâche non liée à la conduite permise par l'automatisation est associée à l'attention, le niveau de distractibilité du sujet et le réengagement dans l'activité de conduite. Nous postulerons en faveur d'une méthodologie expérimentale convaincante, afin de mener à bien cette expérience et d'exploiter les données nécessaires pour répondre à nos interrogations. Puis, nos analyses tenteront de répondre aux problématiques sous-jacentes de compréhension et de prédiction d'un comportement de reprise en main d'un système autonome.

## 2. Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est organisé en quatre chapitres après ce chapitre 0.

Dans le chapitre 1, nous présentons le concept de la conduite automobile, puis la transition de cette dernière vers l'automatisation. Nous parlerons de l'importance de la tâche non liée à la conduite, son association avec l'état du conducteur et ses conséquences. Nous aborderons le principe d'être « dans » et « en dehors de la boucle », les facteurs de perte d'attention et de distractibilité, les différents modèles de comportements des conducteurs lors de la reprise en main de la conduite manuelle, et nous verrons les différents paramètres physiologiques et comportementaux utilisés pour la prédiction de la dangerosité de la reprise de conduite. Nous en terminerons par la présentation des hypothèses et des objectifs.

Dans le chapitre 2 sera présentée la méthode, c'est-à-dire la conception de l'outil de simulation de conduite et la définition des variables explicatives des différents paramètres physiologiques et comportementaux et enfin les variables de performances qualifiant la dangerosité de la reprise de conduite. La mise en place du système de synchronisation des enregistrements, les méthodes de filtration et dépollution et la validation des données seront également des points évoqués dans ce chapitre.

Le chapitre 3 présente les résultats des analyses. Ces résultats portent sur l'association des paramètres physiologiques et comportementaux sur le temps de réponse et sur la dangerosité de la reprise de conduite. Nous présenterons également les résultats de la prédiction du temps de réponse et la dangerosité de la reprise de conduite en situation de conduite automatisée.

Le chapitre 4 portera sur la discussion, c'est à dire l'interprétation des résultats ressortis de ce travail de thèse. Nous parlerons ensuite des limites, autrement dit, des suggestions d'amélioration pour les prochains travaux. Enfin nous terminerons ce chapitre et ce mémoire de thèse par une conclusion.



# **CHAPITRE 1: CONTEXTE THEORIQUE**



# 1. Activité de conduite

## 1.1. Définition de l'activité de conduite manuelle

La conduite automobile est une activité complexe de notre quotidien demandant de fortes ressources attentionnelles. En effet, conduire demande au conducteur de collecter, traiter et analyser beaucoup d'informations liées à l'environnement extérieur afin de réagir à la situation présente et anticiper les événements à venir. Ce traitement d'informations permet au conducteur de se construire une représentation globale de la scène de conduite pour assurer une conduite sûre. La scène de conduite est composée de notions visuelles, topologiques et dynamiques (flux visuel, taux d'expansion des images) mais aussi des notions temporelles, de vitesse, des perceptions de l'état propre, des hypothèses des capacités de réaction, etc. D'autres sens participent également, le bruit moteur, le bruit des autres véhicules, les vibrations, des ressentis d'accélération et tant d'autres.

La conduite dans un environnement dynamique, où l'attention du conducteur est susceptible d'être détournée de l'activité de conduite par une autre activité distractive (par exemple regarder son smartphone), peut s'avérer dangereuse et peut aboutir à des conséquences graves. Dans le cadre de la revue de la littérature, nous présenterons le modèle de Jens Rasmussen définissant l'exécution d'une tâche cognitive selon différents niveaux de contrôles basés sur les compétences, les règles et les connaissances. Nous aborderons également le modèle de John A. Michon, inspiré du modèle de Rasmussen, appliqué à la conduite automobile. Ce modèle la classe en trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel.

## 1.2. Le modèle SRK (Skills-Rules-Knowledge)

En 1983, Rasmussen (Rasmussen, 1983) propose l'un des modèles les plus connus du contrôle cognitif. Son modèle définit trois types de comportements présents dans le traitement de l'information d'un opérateur :

- Le contrôle par les habilités (Skills) : Il s'agit des tâches de routine ou d'automatismes nécessitant peu ou pas d'attention consciente pendant leur exécution. Ainsi, il reste suffisamment de « capacité mentale » pour effectuer d'autres tâches en parallèle. Exemple d'habilités : la coordination motrice que permet l'utilisation des pédales et du boîtier de vitesse ou encore, le traitement des indices visuels dans l'environnement de manière presque automatique permettant à un conducteur expérimenté parcourant un itinéraire familier d'avoir une discussion intelligente avec un passager, parallèlement à la tâche de conduite.
- Le contrôle par les règles (Rules) : Il s'agit de l'exécution d'actions secondaires appliquées à des situations où la prise de décision est fréquente. En prenant exemple sur le conducteur, celui-ci actionnera le clignotant lors d'un changement de direction, freinera à l'arrivée d'un stop ou d'un feu rouge. Exécuter ces actions familières, en plus de surveiller l'exécution des actions basées sur les compétences, utilise une partie de la capacité mentale totale dont dispose le conducteur, mais pas la totalité. Ces actions basées sur ces règles peuvent, avec la répétition d'exécution, devenir des tâches automatiques.
- Le contrôle par les connaissances (Knowledge) : il s'agit d'activités de résolution de problèmes, lorsqu'une personne est confrontée à de nouvelles situations pour lesquelles il n'existe pas de solution classique facilement disponible. Toujours en prenant exemple sur le

conducteur, lorsque celui-ci se retrouve face à une route barrée, il devra résoudre le problème en planifiant un nouvel itinéraire pour arriver à sa destination.

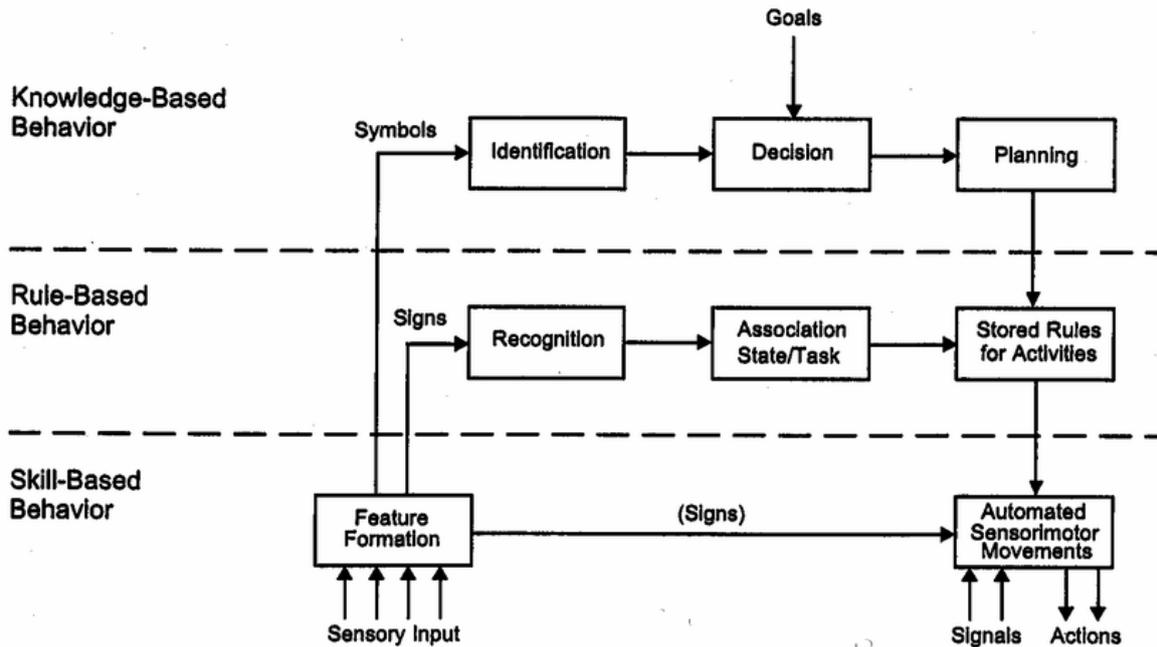


Figure 1 : Représentation du contrôle par les connaissances, les règles et les compétences selon Rasmussen (1983)

Une caractéristique importante de ce modèle est le lien entre les 3 niveaux. Le contrôle par les règles fait appel au contrôle par les habilités, et le contrôle par les connaissances fait appel aux deux niveaux inférieurs. Cela est résumé par la figure ci-dessus (Figure 1).

### 1.3. Modèle de Michon

En s'inspirant du modèle de Rasmussen, Michon a proposé un modèle appliqué à la conduite automobile (Michon, 1985). Michon considère la conduite automobile comme une activité regroupant l'exécution simultanée de tâches et que chaque tâche a un coût cognitif selon sa durée. Concrètement, plus la tâche est longue, plus elle nécessite de ressources cognitives. Le modèle de Michon segmente le comportement du conducteur en trois niveaux hiérarchiques (Figure 2).

- Le niveau stratégique : Il correspond à la planification globale d'un trajet. Cela comprend les activités de navigations, le choix de la route, la stratégie d'évitement d'embouteillages, la durée du parcours ou encore l'heure de départ, l'évaluation des coûts et des risques impliqués dans la conduite. Ces activités ont recours à des fonctions cognitives élevées comme la planification, l'organisation, le raisonnement et la prise de décision. A ce niveau, la contrainte temporelle est faible mais demande un niveau de ressources cognitives élevé.
- Le niveau tactique : Il s'agit de l'ensemble des actions effectuées durant l'activité de conduite. Cela comprend diverses manœuvres telles que l'évitement d'obstacles, le dépassement des autres véhicules, le choix de la distance du véhicule en amont ou le choix de la vitesse. Ces actions font appel à la mémoire de travail, la planification, la flexibilité mentale, et également à des compétences de plus bas niveaux. A ce niveau, la contrainte temporelle est modérée le temps de décision est de l'ordre de la seconde.

- Le niveau opérationnel : Il correspond à la mise en œuvre des actions sélectionnées au niveau tactique (exécution de la manœuvre motrice) comme tourner, maintenir le véhicule dans la voie (composantes latérales) ou freiner et accélérer (composantes longitudinales). Ces actions sont globalement automatisées et ne demandent que très peu de ressources cognitives. La contrainte temporelle est très élevée, le niveau de décision/exécution est de l'ordre de la milliseconde.

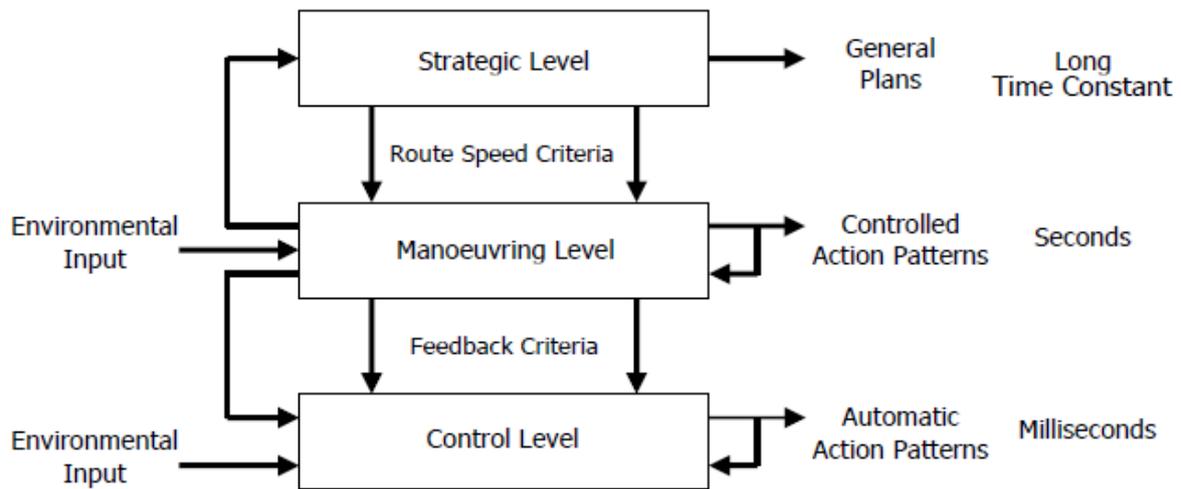


Figure 2 : Représentation des niveaux stratégique, tactique et opérationnel selon Michon (1985)

## 2. Transition vers l'automatisation de la conduite

### 2.1. La classification des niveaux de conduite automatisée

La notion de véhicule autonome désigne un véhicule capable de fonctionner par lui-même et d'exécuter des processus tels que se garer ou circuler sur autoroute ou dans un environnement spécifique sans aucune intervention humaine. Des organismes tels que SAE International (Society of Automotive Engineers) ou NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) ont instauré une classification de l'autonomie des véhicules dans le but de catégoriser ces véhicules automatisés en fonction de leurs capacités (Figure 3).

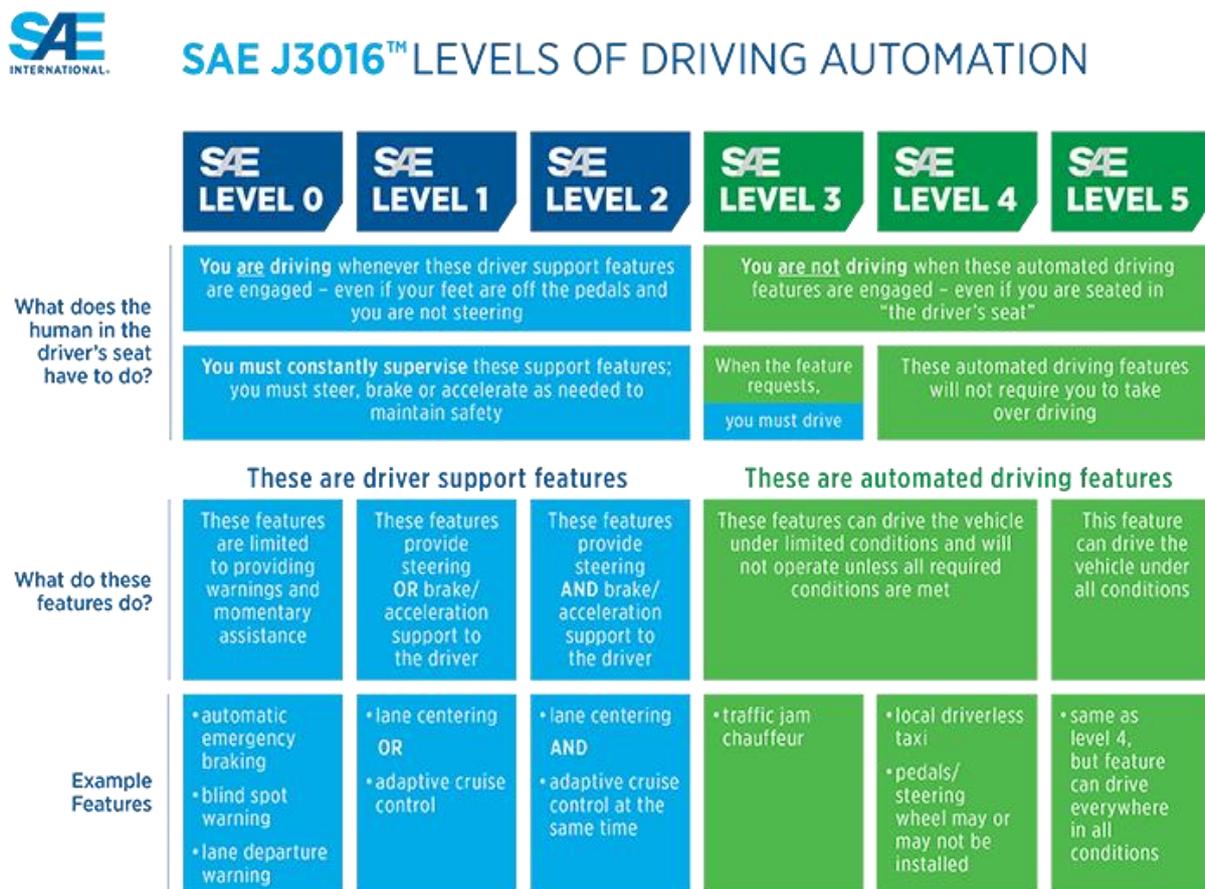


Figure 3 : Classification des niveaux d'autonomie d'un véhicule selon SAE International (Society of Automotive Engineers)

Niveau 0 : Le véhicule est entièrement manuel et le conducteur est entièrement maître de toutes les fonctions du véhicule. Les éléments d'assistance embarqués sont des dispositifs d'avertissement qui ne constituent pas une aide à la conduite (ex : niveau d'essence ou alerte du niveau d'huile).

Niveau 1 « Eyes on » ET « Hands on » (avec les mains) : Le conducteur est assisté dans certaines tâches par un automate. L'assistance concerne soit le contrôle longitudinal (vitesse, distance entre les véhicules), soit le contrôle latéral (contrôle des lignes blanches pour le maintien dans la voie), mais pas les deux en même temps. Le régulateur de vitesse, le radar de franchissement de ligne ou le freinage d'urgence automatique sont des exemples d'aides à la conduite sous surveillance du conducteur.

Niveau 2 « Eyes on » ET « Hands on » OU « Hands off » (avec ou sans les mains) : Dans certaines situations, le conducteur peut déléguer partiellement la conduite à un automate. Il reste tout de même responsable de la supervision et doit se tenir prêt à intervenir (ex : régulateur de vitesse adaptatif, le maintien dans la voie ou le park assist).

Niveau 3 « Eyes off » (sans surveillance visuelle) : C'est sur ce niveau de conduite que portent les travaux de cette thèse. Dans certaines conditions précises, par exemple une conduite sur autoroute, le véhicule est capable d'analyser son environnement de conduite et d'agir en conséquence. Le véhicule est alors capable de varier sa vitesse en fonction de la densité du trafic, ou même d'effectuer un dépassement. Le conducteur est, à partir de ce niveau de conduite, autorisé à effectuer des tâches non liées à la conduite au sein du véhicule (ex : lire, consulter son smartphone). Même si le véhicule est totalement autonome, le conducteur doit rester à sa place et doit se tenir prêt à reprendre le contrôle en cas de besoin. En effet, dans certaines situations, des événements non gérés par le véhicule peuvent survenir, et ce dernier peut ne plus assurer la conduite avec des niveaux de sécurité suffisants. Un signal est alors émis, demandant la reprise en main du véhicule par le conducteur.

Niveau 4 « Mind Off » (sans intervention humaine) : Le conducteur n'a plus besoin d'intervenir, le véhicule est capable de circuler de manière autonome et de gérer les situations qui se présentent à lui. Cette autonomie se limite cependant à des conditions précises, comme une zone géographique par exemple.

Niveau 5 « Driverless » : A ce niveau, le véhicule est à 100% autonome et gère toutes les situations de vie. Le conducteur n'est plus conducteur et devient un simple passager et spectateur de la conduite. A ce niveau, le volant et les pédales ne sont plus nécessaires dans l'habitacle.

Au regard de cette classification des niveaux de conduite automatisée, nous constatons que plus l'automatisation de la conduite est élevée, plus la tâche de conduite est déléguée au véhicule. L'automatisation sort le conducteur de la boucle de gestion de la conduite, que ce soit au niveau de la composante physique ou de la supervision. Nous parlons d'un concept appelé « Out of the loop » (en dehors de la boucle).

### 3. Concept du « Out of the Loop » (en dehors de la boucle)

Le déploiement d'un système de conduite automatisée a pour incidence de retirer le conducteur de la « boucle de contrôle » (moteur et cognitif). Une baisse de la conscience de la situation et du contexte d'évolution du véhicule, au sein du réseau routier, serait une incidence majeure de l'automatisation.

Un conducteur n'ayant pas à surveiller l'environnement pour prendre des décisions finit par devenir spectateur passif de l'environnement de conduite voire se détourner de tout traitement cognitif sur les éléments de cet environnement (cécité cognitive, mind wandering) ou bien placer son attention sur d'autres activités à bord (NDRT) ce qui équivaut à la distraction. Merat et son équipe (Merat et al., 2019), ont tenté de clarifier la définition du concept du d'être en dehors de la boucle ("Out Of The Loop"- OOTL) dans le cadre de la conduite autonome. Ils ont d'abord souligné l'apport de la psychologie du comportement sur la notion de performance. Elle reposerait sur certaines fonctions cognitives dites supérieures, comme la mémoire de travail par exemple, qui exigent un effort attentionnel nécessaire pour traiter des tâches nouvelles ou complexes. Ce type de performance s'oppose à celles dites automatiques qui demandent peu d'effort.

Certains auteurs ont accordé à l'expression "Out of the Loop"(OOTL) une surveillance non active du système et de son évolution suivant la situation du trafic (Casner et al., 2016). Louw et al. (Louw et al., 2015), émettent l'idée que la perte de contrôle physique fait partie intégrante de ce concept. Merat (Merat et al., 2019), propose comme définition de OOTL : « Pas dans le contrôle physique du véhicule, et ne surveillant pas la situation de conduite, ou dans le contrôle physique du véhicule mais ne surveillant pas la situation de conduite », à l'opposé de « in the loop » correspondant « au contrôle physique du véhicule et la surveillance de la situation de conduite », et de « on the loop » correspondant à « non pas dans le contrôle physique du véhicule, mais dans la surveillance de la situation de conduite ».

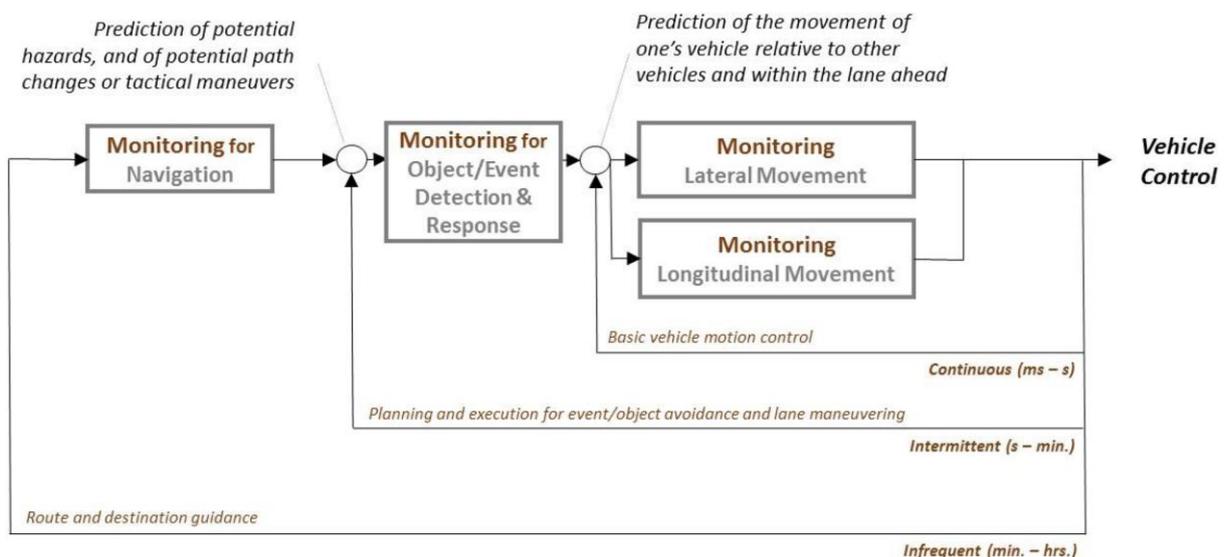


Figure 4 : Présentation des tâches ou fonctions de contrôle hiérarchique multi-niveaux de la conduite. (Merat et al., 2019).

L'apport de Merat & al. (Merat et al., 2019), permet une définition cohérente, puisqu'elle prend en compte le contrôle cognitif et physique. De plus, elle intègre un niveau d'interaction homme-système pendant l'activité de conduite, plus précisément, une interdépendance plus ou moins importante

entre des tâches faisant référence à des boucles d'interactions multi-niveaux. La boucle la plus courte fait allusion aux interactions et ajustements continus lors de la conduite manuelle (changement de direction latérale et longitudinale, freinage, accélération). La boucle médiane évoque des tâches intermittentes pendant lesquelles l'individu planifie et exécute des manœuvres tactiques (changements de voies). Enfin, la boucle extérieure concerne les fonctions stratégiques peu fréquentes, comme le repère spatial au sein d'un itinéraire préalablement dépendant d'une destination (Figure 4).

Pour mieux comprendre l'impact de l'automatisation d'un véhicule, l'importance des dépendances entre les différents niveaux de la conduite doit être soulignée. Par exemple, le niveau de gestion des mouvements longitudinaux et latéraux du véhicule va être associé à sa position dans la voie.

Alors, le risque de rencontrer des obstacles et des dangers dans l'environnement de conduite sera plus ou moins important. L'automatisation du système, permet d'éviter au conducteur les manipulations fréquentes de la boucle interne, qui est caractéristique de la situation de conduite manuelle. Il en est de même pour la réflexion spatio-temporelle du conducteur sur la place de son véhicule au sein du réseau routier (niveau stratégique). Indirectement, cette automatisation permettra de diminuer les interdépendances entre les trois niveaux observables sur cette figure.

Le contrôle manuel du véhicule va également concerner l'interdépendance de ce dernier avec les informations environnementales. Concernant l'information sensorielle qui guide le conducteur, Michaels (Michaels and Cozan, 1963) décrit la conduite comme une tâche principalement visuelle.

Ainsi, elle est directement dépendante de différents facteurs de performances. La vitesse va déterminer le taux d'échantillonnage visuel requis pour permettre les tâches de contrôle, de détection et de manipulations du véhicule (Senders et al., 1967). Plus elle est élevée, plus l'opérateur doit échantillonner fréquemment les informations (courbure de la chaussée, largeur des voies) pour réaliser ses tâches de manipulations.

Aussi, l'automatisation permet d'éviter une charge attentionnelle importante en contrôlant et en limitant la vitesse du véhicule indépendamment de la volonté de l'opérateur. Cet aspect est non négligeable en matière de sécurité et influe également sur le niveau de vigilance et la distractibilité du conducteur.

En effet, une moindre mobilisation des ressources attentionnelles de l'opérateur, concernant les fonctions opérationnelles fréquentes, ou plus précisément, les interactions continues, serait permise par l'automatisation du véhicule.

Il a été expliqué ci-dessus, que la notion de « Out of the Loop » permet de fournir des informations sur la relation présente, entre l'automatisation du système, et la suppression de différents niveaux d'interactions entre le conducteur et le véhicule.

## 4. Performance de la reprise en main

### 4.1. Processus moteur visuel cognitif lors de la reprise en main

Marberger a proposé un modèle résumant le processus de reprise en main de la conduite par le conducteur après une période de conduite automatisée. Ce modèle segmente ce processus en plusieurs parties (Figure 5) (Marberger et al., 2017). En conduisant avec un système de conduite automatisé, l'état du conducteur doit rester compatible avec les limites du système.

Autrement dit, lorsque le conducteur est autorisé à s'engager dans des tâches non liées à la conduite (NDRT) telles que la lecture d'un livre ou la consultation de son smartphone, il doit être également prêt à reprendre le volant suite à une demande de reprise en main par le système (TOR). Dans ce cas, le conducteur doit passer de la NDRT à la tâche de conduite ce qui est décrit comme « transition de l'état du conducteur ».

Dans cette phase, en fonction des NDRTs précédant le TOR, le conducteur peut avoir besoin de rediriger son attention sur la scène de conduite, ou peut avoir besoin de libérer ses mains et de les remettre sur le volant et de remettre les pieds sur les pédales. Pour ces raisons, cette transition de l'état du conducteur peut susciter des demandes variables concernant l'état sensoriel, moteur et cognitif. Le temps nécessaire à cette transition peut donc varier en fonction du nombre et de la complexité des processus sous-jacents. Une fois que le conducteur a désactivé le système de conduite automatisée, il doit par la suite exercer une manœuvre telle que le maintien dans la voie, un changement de voie ou un freinage, suivant la situation à laquelle il doit faire face.

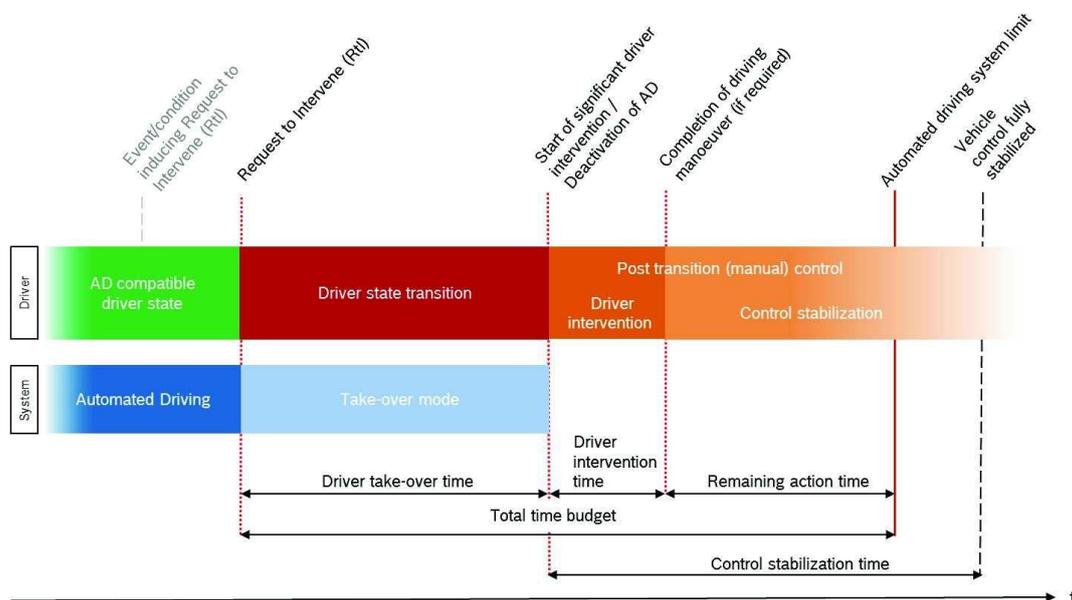


Figure 5 : Modèle du processus de transition de la conduite automatisée au contrôle manuel (Marberger et al., 2017)

D'après Berghöfer, plusieurs facteurs pourraient être associés au processus de reprise (Berghöfer et al., 2018). Ces facteurs sont la complexité et le niveau de détresse de la situation ainsi que de l'état du conducteur juste avant la diffusion d'un TOR.

A titre d'exemple, plusieurs études ont signalé une baisse du niveau de la performance de reprise en main de la conduite lorsque le conducteur était précédemment engagé dans une NDRT (Radlmayr and Gold, 2014; Zeeb Kathrin et al., 2016). De plus, la somnolence ou la fatigue sont généralement associées à un mauvais guidage du véhicule (Matthews and Desmond, 2002; Philip et al., 2005), ce qui peut également détériorer les performances de reprise de conduite et être une source d'accident. Indépendamment de l'état du conducteur, les caractéristiques individuelles des conducteurs peuvent également être associées la reprise en main.

Peu d'études se sont intéressées aux caractéristiques individuelles des conducteurs comme la confiance dans l'automatisation (Hergeth et al., 2016; Körber and Bengler, 2018), le temps de réaction individuel (Kim, 2018; Philip et al., 2005), l'âge (Clark and Feng, 2017; Zhang et al., 2019) ou le genre (Berghöfer et al., 2018).

Une autre étude a constaté que le comportement du regard du conducteur par rapport aux NDRTs pouvait être considéré comme un facteur stable dans l'étude de performances de reprise en main de la conduite (Zeeb et al. 2017). En effet, Zeeb a signalé que la redirection du regard sur la route était plus longue lorsque le conducteur tenait un objet dans ses mains. Une autre étude estime que l'occupation des mains durant l'exécution d'une NDRT pouvait être un facteur à prendre en compte dans l'étude de performance de la reprise en main d'un véhicule (Wan and Wu, 2018).

Seulement, toutes ces études ont pour la plupart été menées sur simulateurs de conduite, et très peu ont étudié la performance de reprise en main en conduite réelle. De plus, la plupart des NDRTs proposées dans les études de conduite automatisée consistent à effectuer des tâches standardisées telles que la Surrogate Reference Task (ou SuRT) (Stojmenova and Sodnik, 2018), qui sont cognitivement ou visuellement exigeantes, mais manquent souvent de validité écologique.

## **4.2. Temps de réponse**

### **4.2.1. Définition et état des lieux**

Le temps de réponse (ou temps de reprise en main - TakeOver Time (TOT)) peut être défini comme le temps entre la demande de reprise en main par le système et l'engagement dans l'activité de conduite par le conducteur (Mcdonald et al., 2019).

L'engagement dans l'activité de conduite est généralement défini dans la littérature par l'action sur la pédale de frein (seuil d'appui de 10% sur la pédale de frein) ou par une action de rotation sur le volant (seuil de rotation de 2°) (Louw et al. 2017; Zeeb, Buchner, and Schrauf 2015; Zhang et al. 2019).

D'autres mesures temporelles pour définir le temps de réponse sont utilisées en prenant en compte le temps entre la demande de reprise en main et soit : la redirection du regard du conducteur sur la route (Eriksson et al., 2019), le repositionnement des mains sur le volant, le repositionnement des pieds sur les pédales (Petermeijer et al., 2017), la redirection du regard vers le rétroviseur extérieur ou la redirection du regard vers le compteur de vitesse (Vogelpohl et al., 2018b), l'activation des clignotants (Li et al., 2018) ou l'activation d'un bouton par pression (Dogan et al., 2017).

Bon nombre de ces mesures du temps de réponse peuvent dépendre de plusieurs facteurs tels que les limites technologiques, l'activité effectuée au sein du véhicule, l'environnement de conduite, les modalités de la demande de reprise en main ou encore les données sociodémographiques. Dans notre cas la fin du TOT a été la désactivation du mode autonome par le conducteur en appuyant sur le bouton de désactivation. En effet cette procédure permet une mesure franche de la désactivation du mode autonome liée également à notre modèle de véhicule autonome simulé. D'autres études prennent la

désactivation par l'utilisation des pédales et/ou le volant (Dogan et al., 2017). Des retards entre l'accès à ces deux dispositifs de commande peuvent faire varier le moment de la désactivation du système, c'est pourquoi, la désactivation explicite par appui sur un bouton a été dans notre cas privilégiée. Dans la section suivante, nous verrons ces facteurs pouvant être associés au Temps de réponse (TOT).

## **4.2.2. Variables associées Temps de réponse (TOT)**

### **4.2.2.1. Le temps disponible**

Le temps disponible (Time Budget (TB)) est le temps mesuré qui sépare le véhicule du participant d'un événement marquant la limite de l'automatisation, c'est-à-dire, un obstacle ou une perte de marquage ou une fin d'embouteillage etc. C'est le temps que le conducteur possède pour reprendre le volant et effectuer la manœuvre que ne peut effectuer le système autonome.

Un large panel d'études a été examiné dans la littérature, et nous avons observé que plusieurs TB avaient été étudiés. Le Time Budget moyen exploré dans la littérature est d'environ 8 secondes.

Des études ont montré que les budgets de temps de reprise influencent fortement le temps de prise de contrôle des conducteurs. Plus le TB est long, plus le temps de reprise est long (Gold et al., 2013, 2017; Happee et al., 2017; Payre and Cestac, 2013; Zhang et al., 2019). Une méta-analyse (McDonald et al., 2019) retrouve cette corrélation en regroupant les résultats de plusieurs études mesurant l'impact du time budget sur le TOT. Différents times budgets allant de 3 à 30 secondes ont été étudiés, et les résultats montrent que pour chaque seconde d'augmentation du time budget, le temps de reprise augmentait de 0.27 secondes. Une autre méta-analyse (Gold et al., 2017) a déterminé que le temps de reprise augmentait de 0.33 s par augmentation de 1 s du Time Budget (pour les time budgets compris entre 5 s et 7,8 s). Une étude (Markkula et al., 2016) a montré une augmentation du temps de reprise de 0.2 s à 0.3 s par seconde d'augmentation du time Budget.

### **4.2.2.2. La tâche non liée à la conduite (Non Driving Related Task)**

Beaucoup d'études utilisent le terme de tâche secondaire supposant que la tâche primaire est la conduite. Mais de fait, lors d'une conduite automatisée, le conducteur ne conduit pas. Dès lors, nous ne pouvons plus parler de tâche secondaire. Le terme de « tâche non liée à la conduite » paraît plus approprié. Les tâches non liées à la conduite sont donc des tâches que le conducteur est autorisé à exercer lorsque la conduite est automatisée. Dans le cadre d'études menées sur la NDRT, nous pouvons en tirer deux catégories : les NDRTs artificielles, c'est-à-dire des tâches qui ne sont pas réalisées couramment dans un véhicule (ex : SuRT - The Surrogate Reference Task) et les tâches naturelles que l'on peut associer à toutes tâches que l'on peut effectuer au sein du véhicule (ex : lire, manipuler son smartphone, écouter la radio) (McDonald et al., 2019).

L'impact des tâches non liées à la conduite sur le temps de reprise en main est fortement lié à la sollicitation manuelle de la tâche. Il a été démontré que le temps de reprise en main sera plus long si le conducteur tient un objet dans ses mains (Wan and Wu, 2018; Wandtner et al., 2018a; Zeeb et al., 2017; Zhang et al., 2019). Une méta-analyse (Zhang et al., 2019) a démontré que tenir un objet dans ses mains augmenterait le TOT de 1,6 secondes. Ce temps supplémentaire est la conséquence du temps de préparation visuelle et physique pour la libération des mains (Dogan et al., 2017; Vogelwohl et al., 2018a; Wandtner et al., 2018a; Zeeb et al., 2017). En d'autres termes, le conducteur a besoin de temps pour regarder l'endroit où il peut déposer l'objet et le déposer (Wandtner et al., 2018a; Zeeb et al., 2017).

L'effet des NDRTs sans implication des mains sur le TOT est moins évident. De nombreuses études n'ont montré aucun impact significatif des NDRTs sur le TOT dans ce cas précis (Gold et al., 2016, 2017; Körber et al., 2016; Naujoks et al., 2018; Zeeb Kathrin et al., 2016).

#### **4.2.2.3. Le type d'alertes pour la demande de reprise en main (TOR)**

La demande de reprise en main (TakeOver Request (TOR)) fait référence à l'alerte du système autonome utilisée pour informer le conducteur d'un événement imprévu (ex : accident sur la route, travaux) nécessitant la reprise en main manuelle du véhicule. Différents types d'alertes existent : les alertes auditives (avertisseur sonore ou demande vocale) (Forster et al., 2017; Walch et al., 2015; Wright et al., 2017), visuelles (allumage de témoin) (Eriksson et al., 2019; Lorenz et al., 2015; Walch et al., 2015), ou vibro-tactiles (vibration dans le volant) (Borojeni et al., 2016).

Certaines études ont effectué les comparaisons sur les types d'alertes pour la demande de reprise en main. Petermeijer a montré que l'association de deux types d'alertes en simultanée entraînait un TOT plus court de 0.2 secondes par rapport aux types de demandes seuls (Petermeijer et al., 2017). Politis a trouvé des résultats semblables, ajoutant que les demandes visuelles ou vibro-tactiles seules entraînaient un TOT beaucoup plus long que l'association de plusieurs alertes ou alerte audio seule (Politis et al., 2017).

#### **4.2.2.4. L'environnement de conduite**

L'environnement de conduite fait référence aux situations de circulation, aux éléments routiers, au nombre de voies, et aux conditions météorologiques entourant le véhicule automatisé. La densité du trafic fait référence au nombre moyen de véhicules présents sur la route sur une distance donnée (ex : par kilomètre, par mile), tandis que le nombre de voies fait référence aux voies de déplacement que le conducteur peut emprunter lors de la reprise en main.

Les éléments de l'environnement de conduite qui ont été explorés dans la majorité des études sur la reprise en main dans le contexte d'une conduite automatisée portent sur la densité du trafic, les voies d'évacuation disponibles, les types de routes et les conditions météorologiques. Cependant, peu d'études ont tenté de déterminer l'impact de ces facteurs sur la performance de reprise de conduite.

Li et son équipe (Li et al., 2018) ont constaté que les conducteurs ont un TOT plus court par temps clair par rapport au brouillard. Ils ont également trouvé que le TOT est plus court sur les routes urbaines par rapport à l'autoroute. Louw (Louw et al., 2017) a constaté que plus le brouillard est opaque, plus le TOT augmente.

Plusieurs études suggèrent que le TOT augmente avec l'augmentation de la densité du trafic (Gold et al., 2016; Körber et al., 2016; Radlmayr and Gold, 2014). Une autre a trouvé que le TOT augmente en fonction de la réduction du nombre de voies de circulation disponibles. (Zhang et al., 2018).

#### **4.2.2.5. Les facteurs humains du conducteur**

Les facteurs humains font référence aux caractéristiques propres au conducteur. L'âge et le genre en font partie. Un large éventail d'âges a été examiné dans les études sur les performances de reprise en main, cependant les résultats sur l'influence de l'âge sur le TOT sont très hétérogènes.

Clark, à travers deux études, a tenté de mesurer l'influence de l'âge sur le TOT à travers deux groupes de conducteurs, un groupe de sujets jeunes (18 à 35 ans) et un groupe de sujets plus âgés (62 à 81 ans). Les résultats relèvent qu'aucun impact de l'âge sur le TOT (Clark et al., 2017; Clark and Feng,

2017). Körber et son équipe (Körber et al., 2016) ont trouvé des résultats similaires à travers deux groupes composés de sujets âgés de 19 ans à 28 ans et de 60 ans à 79 ans. La méta-analyse de Zhang (Zhang et al., 2019) va également dans ce sens.

En revanche, les résultats de la méta-analyse de Gold (Gold et al., 2017) relèvent que le TOT est plus long chez les sujets âgés. Des résultats similaires ont été trouvés à travers deux groupes de sujets jeunes (20–35 ans) et âgés (60–81 ans), où le groupe plus âgé a montré un TOT significativement plus long par rapport au groupe plus jeune (Li et al., 2018).

Concernant l'impact du genre sur le TOT, à ce jour, nous n'avons trouvé qu'une seule étude ayant tenté de travailler sur ce facteur. L'étude de Berghöfer (Berghöfer et al., 2018) démontre que le genre n'est pas associé au TOT.

### **4.3. Qualité de la reprise**

#### **4.3.1. Définition et état des lieux**

La qualité de la reprise peut être qualifiée comme une mesure de la performance de la reprise de conduite manuelle après une période de conduite automatisée. Elle comprend un large éventail de paramètres destinés à mesurer les performances. Parmi ceux explorés, nous avons l'accélération latérale et longitudinale moyenne, minimale et maximale (Clark et al., 2017; Feldhutter et al., 2017), les statistiques de position dans la voie (écart-type, maximum, moyenne) (Clark and Feng, 2017; Vogelwohl et al., 2018a), les mesures basées sur l'angle de braquage du volant comme la vitesse de rotation, sa maximale ou son écart-type (Bueno et al., 2016; Li et al., 2018; Wiedemann et al., 2018), le temps pour effectuer un changement de voie (Bueno et al., 2016), les franchissements de lignes inappropriés (Inappropriate Line Crossing (ILC)) (Wandtner et al., 2018b), le temps nécessaire pour effectuer une manœuvre d'évitement (Bueno et al., 2016), le temps et la distance minimum par rapport au véhicule de devant (Schmidt et al., 2017), les mesures liées au freinage (action du frein, Time To Collision (TTC) (Eriksson et al., 2019; Li et al., 2018)), la collision (Wan and Wu, 2018; Wandtner et al., 2018a), le temps minimum avant le franchissement de voie (minimum time to line crossing –TLC (Gold et al., 2016; Louw et al., 2017; Wan and Wu, 2018)), les statistiques de vitesse (minimum, maximum, moyenne et écart-type (Clark and Feng, 2017; Wiedemann et al., 2018)) et la vérification des rétroviseurs (Hayashi et al., 2020).

Parmi les différents paramètres cités ci-dessus, l'un d'eux est très utilisé dans la littérature et est un bon indicateur des accidents : le TTC ou Time to Collision. En 1972, Hayward définit le TTC comme le temps nécessaire à deux véhicules pour entrer en collision s'ils continuent à rouler à leurs vitesses de manière constante et sur la même trajectoire (Hayward, 1972). Depuis, il a été adapté pour la conduite autonome comme « le temps dont le véhicule a besoin pour atteindre la voiture stationnaire devant si elle continue à rouler à la même vitesse » au point qu'elle évite à la voiture stationnaire avec non-dangereuse (Li et al., 2018). Le TTC permet de représenter le contrôle longitudinal du véhicule par le conducteur. Par exemple, la décision de freiner fortement implique un allongement du TTC, et implique une gestion et appréhension de la reprise de conduite par le conducteur. Dans tous les cas, il faut noter que le TTC ne peut être utilisé que si la reprise en main implique un changement de voie.

Les différents paramètres cités ci-dessus montrent que la définition de la qualité de la reprise de conduite dans le cadre d'une conduite automatisée est encore difficile à définir. Toutefois, la majorité de ces paramètres sont orientés sur le contrôle latéral et longitudinal du véhicule, deux composantes liées au comportement du conducteur. A travers ces paramètres, le contrôle latéral fait référence à l'utilisation du volant et le contrôle longitudinal fait référence à l'action du frein.

## **4.4. Modèles de comportement des conducteurs lors d'une reprise en main en conduite autonome**

Ce paragraphe se base sur les articles de revue de Macdonald (McDonald et al., 2019) et Markkula (Markkula et al., 2012).

Si nous considérons les manœuvres d'évitement des collisions critiques mises en œuvre en conduite manuelle, le freinage seul (sans changement brusque de direction/voie) a été identifié comme la première réaction la plus naturelle pour la plupart des conducteurs. Le changement brusque de direction (seule ou associée au freinage) a été observée plus fréquemment lorsque les valeurs du TTC sont très courtes, de sorte que le conducteur peut percevoir que le freinage est insuffisant pour éviter la collision. Les conducteurs ont tendance à ne pas braquer tant que la stabilité de leur véhicule n'est pas atteinte. Ce comportement pourrait être dû, soit parce que les conducteurs ne maîtrisent pas les accélérations latérales élevées, soit dû aux risques supplémentaires perçus en cas de changement brusque de direction. Depuis de nombreuses années, la modélisation du comportement des conducteurs dans des situations de collision suscite un intérêt croissant. Ces modèles tentent de prédire les manœuvres qui seront effectuées, l'impact de l'état et des intentions du conducteur, et de l'effet des facteurs environnementaux. Les modèles développés dans le cadre de la conduite manuelle pourraient être étendus aux modèles de reprise en main de la conduite autonome qui devraient ainsi prédire le freinage, le changement de voie/direction et la prise de décision.

### **4.4.1. Modèle prenant en compte le freinage**

Dans le cadre de la conduite manuelle, le TTC est un facteur déterminant dans la décision de freiner (Lee, 1976). Le TTC serait estimé en fonction de l'angle de vision qui part de la rétine du conducteur à l'obstacle. Le TTC défini pour la conduite manuelle, est comparable au Time Budget dans le cadre de la conduite autonome. Toutefois, il existe plusieurs modèles de freinage qui peuvent être classés en 3 types : les automates cellulaires, d'angle de vision et de vitesse relative. Pour McDonald (McDonald et al., 2019), les modèles d'angles de visions sont les plus prometteurs dans le cadre d'une reprise en main de véhicule.

Les modèles d'angle de vision estiment que la décision de freiner ou d'accélérer dépend de la différence entre l'angle visuel actuel et l'angle visuel souhaité (approximé par la largeur et l'espacement). La limite de ces modèles est qu'ils postulent à une relation linéaire entre le changement d'angle de vision et l'intensité du freinage qui n'est pas observée en conditions réelles.

Les modèles d'accumulation de preuves visuelles considèrent que les conducteurs décident de freiner en fonction des preuves suffisantes accumulées. Les preuves peuvent consister en l'activation des feux de freinage des véhicules de tête, en des changements de l'angle visuel du véhicule de tête, en un changement de voie du véhicule de tête, ou en tout autre changement environnemental que le conducteur peut percevoir (alerte système). Les modèles d'accumulation de preuves considèrent également que la décision de freiner peut-être un comportement prédictif, où les conducteurs utilisent le freinage pour réduire les erreurs de manœuvres.

### **4.4.2. Modèle de changement de voie ou d'évitement**

Les modèles de direction du conducteur sont généralement basés sur les concepts de la théorie de contrôle et ils peuvent être classés en trois types : modèles en boucle fermée, en boucle ouverte et hybrides en boucle ouverte-fermée. Ces modèles suggèrent que les conducteurs réagissent

principalement dans les cas où ils disposent d'un time budget suffisant. Toutefois, le changement de voie peut également être utilisé comme un dernier recours pour éviter un accident ou lorsque la sortie de la voie actuelle est la seule voie d'évacuation. Généralement les conducteurs effectuent un braquage initial important suivi de plusieurs petites corrections.

Dans le cadre de la conduite autonome, lors de la reprise en main, le changement de voie peut être représenté par des contrôles en boucle ouverte ou hybride. L'influence des NDRT sur la reprise en main suggère également que les modèles cybernétiques peuvent être utiles car ils vont inclure les processus neuromusculaires et visuels impliqués dans la transition entre NDRT et reprise de la conduite.

#### **4.4.3. Modèle de freinage et d'évitement**

Comme nous l'avons vu plus haut, les décisions de freinage ou changer de voie sont influencées par le Time Budget. Lorsque les conditions de circulation le permettent, les conducteurs ont tendance à effectuer un changement de voie lorsque le time budget est important. Lorsque le time budget est court, les conducteurs effectuent de manière générale un freinage, mais peuvent également inclure un changement de direction d'urgence en dernier recours pour éviter la collision. Ainsi, la prise de décision par des manœuvres d'évitement peut être considérée comme une cascade de décisions multiples et d'exécution d'actions.

#### **4.4.4. Modèles dans le cadre de la conduite autonome**

Actuellement Il n'existe pas vraiment de modélisation de la reprise en main dans le cadre de la conduite autonome. Toutefois, Markkula et son équipe (Markkula et al., 2018) ont tenté de développer un modèle décrivant le processus de prise de contrôle à travers une série de solutions, de décisions perceptives et de décisions d'action. Les solutions sont déterminées par la position du regard, et les décisions sont prises en fonction des accumulations de preuves. Les décisions perceptives sont : si le conducteur rattrape le véhicule devant lui, si la décision préalable de freiner résout le problème, et si un contrôle de sécurité lors du changement de voie est effectué. Les décisions d'action comprennent l'examen de la route, la recherche d'une possibilité de changement de voie, l'augmentation du freinage et le changement de voie. Les deux premières décisions déterminent le comportement du regard du conducteur, et les deux dernières décisions déterminent la sélection des manœuvres.

Si les réactions aux reprises en main ont souvent été mesurées à l'aide du TOT, il existe plusieurs limites à l'utilisation de cette mesure comme prédicteur des résultats en matière de sécurité (Louw et al., 2017). Bien que dans la plupart des cas, un TOT court augmente la probabilité d'une réaction de changement de voie plus sûre, le TOT ne peut pas être directement mis en relation avec une prise de décision sûre, tel qu'un changement de direction ou un freinage adapté (Louw et al., 2017; Mole et al., 2019). Dans un scénario de collision impliquant un changement de voie, les mesures dérivées du temps restant avant la collision avec un obstacle (TTC par exemple), sont les mesures les plus utilisées et les mieux adaptées. En revanche dans un scénario de maintien de la trajectoire, la mesure pertinente est le temps au franchissement de la ligne (Mole et al., 2020). Dans tous les cas, ces mesures de performances, ne prédisent pas une manœuvre sans risque ni l'évitement d'un accident.

Afin de mesurer la qualité de la reprise, certains auteurs utilisent l'association entre TTC et dérivée maximale de l'entrée de contrôle (Louw et al., 2017). Cette dérivée maximale prend en compte le début de la manœuvre mis en œuvre par le conducteur : changement de voie (angle de rotation du volant) ou freinage (position de la pédale de frein). Li et son équipe (Li et al., 2018) ont introduit la notion de collision (accident ou sortie de route) pour qualifier la reprise.

# 5. Paramètres physiologiques et performance de la reprise en main

## 5.1. L'activité cardiaque

### 5.1.1. Le fonctionnement du cœur

Le cœur est un muscle composé de quatre cavités (deux oreillettes et deux ventricules). Les parois des ventricules, plus épaisses que celles des oreillettes, permettent de propulser le sang avec plus de force. Le cœur agit comme une pompe. Le sang qui vient des muscles et des autres organes arrive dans l'oreillette droite qui, en se contractant, le pousse dans le ventricule droit. Celui-ci se contracte à son tour pour envoyer le sang veineux vers les poumons. Le sang oxygéné revient dans l'oreillette gauche qui le propulse dans le ventricule gauche. En se contractant fortement, celui-ci envoie ce sang oxygéné dans les organes par le biais d'une grosse artère, l'aorte. Les contractions des deux oreillettes, comme celles des deux ventricules, ont tendance à se produire en même temps.

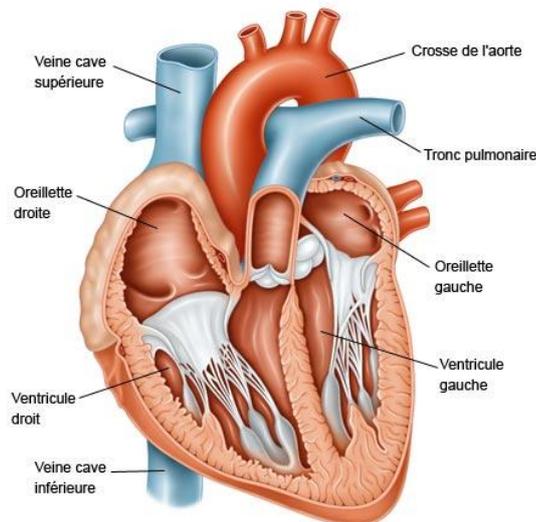


Figure 6 : Anatomie du cœur

Un électrocardiogramme (ECG) est une mesure de l'activité électrique du cœur. Il permet de détecter des anomalies de la fréquence cardiaque. L'ECG enregistre au total cinq ondes, respectivement nommées P, Q, R, S et T. La première, l'onde P, est une onde de dépolarisation des oreillettes. C'est le courant électrique qui passe dans les oreillettes, entraînant leur contraction. Les trois suivantes (QRS), appelées complexe QRS, forment une onde de dépolarisation des ventricules qui entraînent la contraction des ventricules. La dernière onde (T) indique le moment de la mise au repos des ventricules.

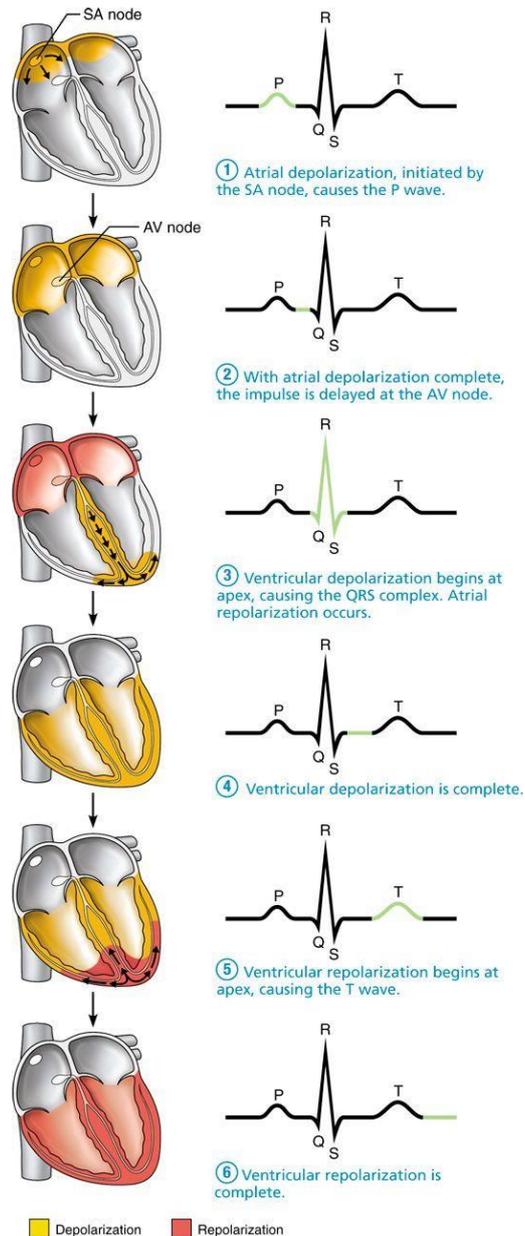


Figure 7 Représentation graphique des différentes ondes enregistrées par un ECG

### 5.1.2. Indicateurs temporels de l'activité cardiaque

Taher Alrefaie (Alrefaie et al., 2019) a découvert une corrélation positive entre la fréquence cardiaque induite et le temps de reprise en main d'un véhicule autonome. Mullen et son équipe (Mullen et al., 2012) ont démontré que l'augmentation de la fréquence cardiaque et de l'effort mental auto-déclaré étaient associés à une amélioration de la performance de conduite manuelle d'un véhicule. Ils ont également découvert une corrélation entre l'augmentation de la variabilité de la fréquence cardiaque et l'amélioration des performances en situation de compétition lors de la conduite manuelle. Ils ont associé à cette relation une baisse de l'effort mental auto-déclaré par le conducteur lors de l'amélioration des performances. Au cours d'un effort mental ou d'une augmentation du niveau attentionnel, la variabilité du rythme cardiaque (calculée par les domaines des hautes et basses fréquences) a tendance à diminuer (Awais et al., 2017). Au niveau du domaine temporel, l'écart-type des intervalles inter-battements (SDNN) et la moyenne quadratique des différences successives de la fréquence cardiaque (RMSSD) sont modifiés lors d'un déficit attentionnel (Cowley et al., 2016).

### 5.1.3. Indicateurs fréquentiels de l'activité cardiaque

La fréquence cardiaque augmente par l'accélération du nerf sympathique quand un conducteur est imposé avec des tâches cognitives au volant (Moriguchi et al., 1992; Tancini et al., 2012). Park et Thayer (Park and Thayer, 2014), évoquent l'importance de l'activité du nerf vague dans la régulation de l'état psychophysiologique d'un individu. Il a été souligné que le contrôle de l'activité vagale joue un rôle essentiel dans l'attention soutenue (Richards, 1987). Cette découverte a été soutenue par le modèle de l'intégration viscérale décrit par Thayer (Thayer et al., 2009) : les auteurs expliquent les relations entre contrôle de l'activité cardiaque vagale (CVC) et le réseau central autonome (RCA). Le RCA comprend un circuit neuronal appartenant à plusieurs structures situées sur la partie frontale du cerveau (notamment le Cortex Cingulaire Antérieur, et la partie Ventro-Médiale Frontale). L'activité du RCA est influencée par des « neurones sympathiques et parasympathiques » qui innervent le cœur. Cette boucle de feedback interdépendante nous intéresse, pour cause, il a été reporté que l'activité du CVC, médiée par le RCA, est sous dépendance de structures neuronales impliquées dans des fonctions exécutives comme l'attention. Friedman et Thayer (Friedman and Thayer, 1998), ont montré qu'une baisse de l'activité cardiaque parasympathique, c'est-à-dire une augmentation de l'activité basse fréquence du cœur (LF), serait associée à une baisse de la modulation du RCA sur l'activité du CVC. Alors, l'activité parasympathique régulatrice de l'activité cardiaque serait moins importante. Cette baisse de la régulation vagale serait explicable par une diminution de la modulation du RCA opérée par le CVC, sous-jacente à une moindre activation des processus attentionnels. Awais et son équipe (Awais et al., 2017), ont souligné qu'une baisse de la LF lors de l'automatisation de l'activité de conduite était visible chez le conducteur. A l'inverse, une meilleure gestion des interdépendances entre le CVC et le RCA entraînerait une hausse de l'activité de la bande haute fréquence du cœur (HF), propice à une réduction de la sollicitation cardiaque. Chang et Huang (Chang and Huang, 2012), ont montrés une baisse du ratio basse fréquence haute fréquence (LF/HF) lors de l'investissement des processus attentionnels. Cette découverte postule en faveur de l'influence positive du RCA, sur l'activité de la bande haute fréquence et la baisse de l'activité cardiaque permise par le CVC. Une baisse du ratio LF/HF lors de l'automatisation de l'activité de conduite a été découverte par Awais et son équipe (Awais et al., 2017). Ces marqueurs n'ont pas été étudiés dans le cadre d'une NDRT permise par un système de conduite autonome.

### 5.1.4. Indicateurs géométriques de l'activité cardiaque

Balle (Balle et al., 2013) a démontré qu'une hausse de la variabilité cardiaque pouvait expliquer un meilleur contrôle attentionnel. Zheng (Zheng et al., 2018) a étudié le graphique de Poincaré d'un conducteur, c'est-à-dire une figure des ellipses qui rend compte de la variabilité cardiaque du sujet sur la base des mesures du SD1 (mesure de la variabilité sensible aux variations à court terme de la fréquence cardiaque) et du SD2 (variabilité à long terme). Les auteurs ont évoqué une baisse significative des indicateurs géométriques SD1, SD2, SD1/SD2 de la variabilité cardiaque, entre une conduite de longue durée et un état d'alerte chez le conducteur lors de la conduite manuelle. Michael (Michael, 2011) a souligné des différences significatives, pour les marqueurs SD1, SD2, pour l'interpolation triangulaire des intervalles NN (TINN) et pour l'index triangulaire de l'histogramme des intervalles NN (TRI), entre une situation de conduite normale et une double tâche, mettant en jeu différentes tâches secondaires à l'activité de conduite. Les résultats montrent une baisse de l'activité de ces biomarqueurs, par rapport à la situation de conduite normale, et pendant l'activité d'écriture d'un message sur le portable du conducteur. Selon la découverte de Balle (Balle et al., 2013), cette baisse des indicateurs de variabilité cardiaque pourrait diminuer le contrôle attentionnel chez le

conducteur. A ce jour, ces marqueurs n'ont pas été étudiés dans le cadre d'une NDRT imposant la reprise en main d'un véhicule autonome.

## 5.2. L'électroencéphalogramme

L'électroencéphalogramme (EEG) est une technique utilisée pour étudier l'activité électrique cérébrale. Le principe est de fixer sur le cuir chevelu du sujet des électrodes enduites d'une pâte conductrice ou d'un gel conducteur. Ces électrodes enregistrent l'activité électrique du cerveau, plus précisément des neurones. L'EEG est utilisé en neurologie pour établir des diagnostics, mais aussi en neurosciences pour approfondir les connaissances sur le cerveau. En effet, un EEG permet d'identifier et de caractériser des états psychologiques ou des états pathologiques à travers différents rythmes cérébraux. Les rythmes cérébraux sont des signaux spontanés, ce qui veut dire qu'ils ne sont pas induits par une stimulation externe. Ces rythmes sont utilisés pour classer les différents stades de sommeil, identifier des patterns d'activité neuronale atypiques associés à des pathologies (ex : épilepsie, tumeurs cérébrales), ou alors à des états de conscience et de vigilance.

Dans la littérature, l'EEG de veille est présenté comme un des outils les plus prometteurs pour détecter les changements attentionnels en situation de conduite automobile. Ces changements sont interprétés au travers de l'activité des ondes delta, thêta, alpha, bêta, et gamma relevées par l'EEG (Lal and Craig, 2002). Les ondes delta (de fréquence inférieure à 4Hz) sont des ondes lentes présentes lors d'un état de méditation profonde ou d'un état de sommeil lent profond. A l'éveil, ces ondes sont très souvent présentes en position antérieure, puisqu'associées aux mouvements oculaires. Les ondes thêta (4 à 8 Hz) correspondent entre autres, à des états de relaxation profonde ou de pression émotionnelle. Les ondes alpha (8 à 13 Hz), sont présentes lors d'un état d'éveil, de vigilance ou de méditation légère. Elles sont également présentes lorsque le sujet ferme les yeux. Elles sont associées à la coordination d'activité mentale et à l'apprentissage. Les ondes bêta (13 à 35 Hz) s'associeraient plutôt à un état d'alerte, lorsque le sujet est dans ses pensées ou reçoit un stimulus sensoriel, et les ondes gamma (de fréquence supérieure à 35 Hz) sont les plus rapides. Elles sont associées au traitement d'information par différentes régions du cerveau). Ces ondes apparaissent lors d'état nécessitant un haut niveau d'attention ou de concentration (Craig et al., 2012; Liu et al., 2013).

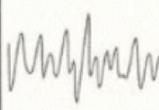
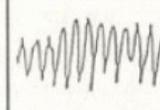
<b>DELTA</b>	<b>THETA</b>	<b>ALPHA</b>	<b>BETA</b>	<b>GAMMA</b>
Inférieure à 4Hz	4 à 8 Hz	8 à 13 Hz	13 à 35 Hz	Supérieure à 35Hz
Sommeil profond	Somnolence	Relaxation	Une attention à son maximum	Excitation
				

Figure 8 : Les différentes ondes de l'activité cérébrale

Almahasneh montre en 2014 que la réalisation d'une tâche mentale secondaire pendant la conduite en simulateur (non autonome) influence l'activité EEG ainsi que la zone cérébrale de façon différente en fonction de la nature de la tâche (prise de décision, calcul mental, etc...)(Almahasneh et al., 2014). Il conclue que, de façon générale, la distraction mentale augmente l'activité EEG dans la région frontale dans l'alpha, le thêta et le bêta. Les états d'inattention au volant peuvent également détourner l'attention de l'activité de conduite. Le traitement de « pensées non liées à la tâche » ou « mind wandering » est, à présent, reconnu pour provoquer une réorientation de l'attention de l'activité en cours vers ses pensées intérieures (Galéra et al., 2012). De plus, la distraction peut interagir avec la

somnolence. La somnolence au volant est actuellement bien détectée et de nombreux systèmes en permettant la détection ont été développés. Ils recueillent et intègrent les données physiologiques telles que l'analyse du regard, l'électroencéphalogramme, la fréquence cardiaque ou les performances du véhicule (nombre de franchissements de ligne inappropriés (Inappropriate Line crossings - ILC) ou instabilité du véhicule dans la voie).

A ce jour, aucune étude n'a permis de définir le niveau attentionnel d'un conducteur en conduite autonome et pendant la reprise en main. En revanche, en fonction des travaux antérieurs, il est possible de définir certains paramètres électrophysiologiques ou comportementaux comme candidats pour l'évaluation du niveau attentionnel et le seuil de distractibilité des conducteurs. L'attention est une variable essentielle à la qualité de la conduite. De nombreuses études exposent les effets négatifs de la fatigue et/ou de la baisse d'attention sur la conduite. Les patients souffrants de troubles du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA/H) ont plus d'accidents, reportent plus d'épisodes de fatigue au volant, et sont également plus sujets à des évitements de justesse causés par la fatigue et/ou l'inattention (Philip et al., 2015). L'analyse de l'EEG permettrait d'appréhender le contrôle cognitif et le niveau d'attention. Le contrôle cognitif reposerait sur la dynamique cérébrale sous-jacente reflétée dans l'activité thêta, en particulier dans les régions frontales (Cavanagh and Frank, 2014). De plus, l'augmentation de l'activité alpha pariétale lors de la conduite en simulateur a été associée au « mind wandering » (errance mentale) (Baldwin et al., 2017). Également, l'augmentation du ratio des bandes thêta/bêta en frontal serait un indicateur d'une diminution de l'attention, notamment observée chez les patients TDA/H (Putman et al., 2014). De nombreux autres indicateurs ont été pointés du doigt comme ayant un lien avec l'attention : le rythme bêta en frontal aurait une corrélation positive avec le niveau d'attention (Liu et al., 2013). De plus, l'activité bêta au centre de la ligne médiane (Cz) a diminué de manière significative avec la charge mentale augmentée. Le rythme alpha bas aurait lui une corrélation négative avec l'attention (Kamzanova et al., 2014). De plus, une suppression du rythme alpha et bêta en pariéto-occipital lors d'une augmentation de l'attention visuelle (Hasler et al., 2016) a été observée chez des patients souffrant d'un déficit de l'attention (trouble du déficit attentionnel et hyperactivité - TDAH). Encore, la tâche de conduite lorsqu'elle est prolongée est susceptible de provoquer de la fatigue mentale, qui se traduit par une diminution de l'attention et une augmentation du sentiment d'endormissement. Selon deux études de 2012, cela peut se traduire sur l'EEG par une diminution du bêta dans la région occipito-temporale et/ou des augmentations dans le thêta en fronto-médian, alpha sur la midline et delta en fronto-latéral (Zhao et al., 2012), et/ou des augmentations du thêta en temporal, d'alpha sur les 2/3 antérieurs et de bêta en pariéto-frontal (Craig et al., 2012).

En conclusion, il ressort que l'analyse des bandes thêta, alpha, bêta et gamma de l'EEG devrait permettre d'évaluer les fluctuations de l'attention. La localisation cérébrale des modifications de l'EEG semble déterminante, cela implique qu'il faudra enregistrer plusieurs localisations cérébrales.

### **5.3. Oculométrie (OM)**

L'oculométrie, appelé plus communément « Eye-Tracking » en anglais, est une technologie qui permet d'analyser l'activité oculaire d'une personne en réalisant un suivi de son regard. Cette technique permet de savoir avec précision où regarde l'utilisateur, ce qu'il voit et ce qu'il ne voit pas. Un système d'Eye-Tracking est constitué de capteurs haute précision, associés à un écran ou intégrés à une monture de lunettes. Le système est composé de deux caméras infra-rouges fixées sur chaque œil de l'utilisateur. Le faisceau infrarouge issu des deux caméras se réfléchit sur la rétine, crée une pupille brillante pour le suivi du regard. Une troisième caméra, dite « camera de scène », filme le point de vue

de l'utilisateur. Celle-ci communique avec les deux autres caméras afin d'inclure dans le flux vidéo la position du regard du sujet en temps réel.

### **5.3.1. Prise en compte des saccades oculaires**

L'utilisateur dispose d'un système oculomoteur. Il produit naturellement des mouvements oculaires rapides et précis appelés « saccades ». Ces mouvements sont effectués afin de ramener l'image des objets d'intérêt sur la fovéa, qui est la zone centrale de notre rétine (Habchi, 2016). Louw et Merat (Louw and Merat, 2017) ont vérifié si la suppression des informations pertinentes à la conduite lors de la NDRT (appariement de formes visuo-spatiales, connaissances générales sur des questions mathématiques modérément difficiles) avait un effet sur l'attention visuelle des participants lors de la reprise en main d'un véhicule. Ils ont placé les participants en situation en dehors de la boucle (Out Of The Loop) cognitive et physique au cours de l'automatisation (Merat et al., 2019). Les résultats montrent que la NDRT, lors de la phase automatisée, a peu d'impact sur les stratégies d'attention visuelle au cours de la reprise en main du véhicule. Ces dernières étant similaires pour toutes les tâches proposées chez chacun des participants.

La Formation Réticulée Paramédiane Pontine (FRPP) est constituée de neurones appelés « générateurs saccadiques », certains d'entre eux sont actifs uniquement pendant les saccades. Ces neurones sont issus d'une couche profonde située au sein du colliculus supérieur (CS), leur implication dans le contrôle visuel concerne la transmission des signaux moteurs jusqu'aux muscles oculomoteurs antagonistes (Ramanoel et al., 2018). Gandhi et Katnani (Gandhi and Katnani, 2012) ont montré que le lieu d'activation des neurones, au sein du CS, joue un rôle majeur dans la distance de la saccade. Smalianchuk, Jagadisan et Gandhi (Smalianchuk et al., 2018) ont découvert la présence d'une corrélation positive entre les vitesses des saccades et l'activation de certains des neurones du CS, cette découverte confirme les hypothèses de Groh et Sparks (Groh and Sparks, 1996), sur l'existence d'une relation entre le niveau global d'activation du CS et les vitesses des saccades. Ainsi, les activations de certains neurones, appartenant à cette structure, constituent une source d'intérêt majeur pour notre sujet. Leur structure d'appartenance, le CS, est une zone qui a été définie par Zénon et Kraulis (Zénon and Kraulis, 2014), comme étant un centre de contrôle attentionnel et un générateur de saccades. Shepherd, Findlay et Hockey (Shepherd et al., 1986) accordent une importance particulière à l'implication des processus attentionnels dans la génération des saccades. Ils ont proposé une expérience permettant de manipuler l'attention spatiale en faisant varier la probabilité d'apparition de stimuli dans la zone périphérique du sujet. Ils ont analysé les résultats lorsque la saccade était éloignée de la position la plus probable d'apparition du stimulus, et ont attribué à ce résultat une allocation des ressources attentionnelles après la fin de la saccade. Ils ont découvert que la préparation d'une saccade, qui sous-entend une implication des processus attentionnels du sujet, induirait, chez ce dernier, un temps de réaction au stimulus plus faible. Ainsi, la relation entre l'action de réalisation des saccades oculaires et l'attention d'un sujet induirait une composante de performance (temporelle et spatiale) qui serait explicable par l'activité réalisée avant la saccade. Cela viendrait souligner l'importance de l'exploitation des variables oculomotrices dans notre analyse de qualité de la reprise en main du véhicule autonome.

Afin de réduire les effets négatifs de la tâche secondaire sur la "conscience de la situation", une partie des processus cognitifs serait alors axée vers la tâche de supervision (Lerner et al., 2015). Une des explications serait que le conducteur tenterait de réduire l'impact du coût cognitif d'une saccade potentiellement induite par l'environnement. Cet aspect stratégique est important puisque, plusieurs fonctions cognitives sont inhibées pendant les saccades (Rayner, 1998). Carsten et son équipe (Carsten et al., 2012), ont montré que les mouvements des yeux des conducteurs sont généralement plus

dispersés lorsque le conducteur se concentre sur une NDRT, en comparaison avec une visualisation de l'environnement routier, ayant lieu lors de la conduite manuelle. A ce jour, aucune étude n'a tenté d'exploiter les dispersions de saccades, dans l'objectif de quantifier des performances de reprise en main d'un véhicule autonome.

### **5.3.2. Prise en compte du temps de fixation**

Tatler (Tatler et al., 2010) a fait émerger un lien entre la fixation oculaire et les processus cognitifs en montrant que la variabilité des zones de fixation chez l'exécutant est explicable par l'administration de différentes consignes au sein d'un même environnement. Ainsi, l'objectif de la tâche est un facteur de haut niveau qui est largement associé à la durée de fixation sur un stimulus (Mills et al., 2011). Selon Henderson (Henderson, 2003), la durée de fixation varie selon le niveau de sollicitation des processus attentionnels du sujet. Les processus cognitifs interagissent entre eux et avec l'image de la scène, pour déterminer une zone de fixation oculaire (position de fixation) en fonction de la nécessité des stimuli, compte tenu de la tâche à réaliser.

Ainsi, la durée et la position de fixation témoignent des processus cognitifs comme l'attention ou la mémoire à court terme. Cette durée peut varier, si l'attention sélective du sujet est importante, alors le traitement sera réalisé de manière plus rapide. De plus, la mémoire à court terme concernant les informations environnementales préalablement observées peut permettre au participant de se focaliser rapidement sur les stimuli nécessaires à la réalisation de la tâche. Selon Fize (Fize, 2006), lorsque le temps de fixation est inférieur à 150 ms ou supérieur à 900 ms, le niveau de vigilance du sujet est faible. Du fait de l'impact des processus cognitifs sur le temps de fixation, Pomplun et son équipe (Pomplun et al., 1996) ont analysés la distribution de l'attention chez l'exécutant en s'intéressant au temps de traitement. Ils prennent en compte la distribution spatiale des fixations pondérée par la durée de fixation. Ainsi, ils interprètent le paysage pondéré en fonction de la durée de fixation comme un "paysage attentionnel" associé à l'interprétation de la scène. Ils observent que la majorité des fixations chez les sujets se concentre alors sur les objets spécifiques d'intérêts.

### **5.3.3. Prise en compte de la dilatation de la pupille.**

Beatty (Beatty, 1982) a démontré que la prise en compte du diamètre pupillaire et de la dilatation maximale donne un indicateur de la charge cognitive du traitement de l'information. Les réponses pupillaires s'amplifient lors de l'évolution des paramètres au sein d'une même tâche afin d'augmenter la demande de ressources de traitement des tâches (Navon and Gopher, 1979). Kahneman et Beatty (Kahneman and Beatty, 1966) ont montré que l'organisation d'un acte moteur impose une sollicitation des ressources de traitement de l'information qui est réinterprétée dans la réponse pupillaire de la tâche à accomplir. Cet aspect souligne que l'activité cognitive et motrice de reprise en main du véhicule chez l'utilisateur peut être étudiée par le biais des réponses pupillaires. L'augmentation du diamètre de la pupille est associée positivement à la sollicitation du tonus sympathique (Marshall, 2002). Ainsi, la composante phasique du diamètre pupillaire chez le sujet peut être extraite afin de renseigner sur l'aspect émotionnel engendré par le stimulus proposé. Les changements de ce paramètre dans le temps (composante tonique), permettent de rendre compte de l'état de vigilance du sujet (Granholm and Steinhauer, 2004).

## 6. Hypothèse et objectifs

Dans le cadre des travaux portant sur la prédiction de la dangerosité de la reprise de conduite, nous avons recueilli des informations provenant de différentes sources : l'activité et les performances de conduite, la transition vers l'automatisation de la conduite et la place du conducteur dans cette transition, et données physiologiques et comportementales du conducteur.

La première hypothèse de cette étude est que le monitoring et l'analyse en continu de certains paramètres physiologiques et comportementaux, 2 minutes avant la demande de reprise en main du véhicule par le conducteur, permettront de prédire le temps de réponse (TOT) et la dangerosité de la reprise (dangerosité de la manœuvre). Les paramètres considérés comme de bons candidats pour évaluer la vigilance et l'attention sont l'EEG, la fréquence cardiaque, et l'analyse du regard.

La seconde hypothèse de cette étude est que la nature et la durée de la tâche non liée à la conduite modifient le temps de réponse (TOT) et la dangerosité de la reprise. En effet, si cette tâche est plutôt cognitive, motrice (solicitation des mains et de la tête) ou cognitivo-motrice, elle aura un impact sur l'effort du réengagement dans la conduite automobile. C'est pourquoi, le conducteur sera étudié au cours de plusieurs tâches non liées à la conduite telles que répondre au téléphone, jouer à un jeu vidéo, lire un livre, écouter un audiobook, regarder un film et manger/boire.

La troisième hypothèse est que les caractéristiques du conducteur, en particulier l'âge et le genre modifient le temps de réponse (TOT) et la dangerosité de la reprise.

Enfin, la dernière hypothèse est que les critères (freinage, déviation latérale, vérification de la scène de conduite et franchissement inapproprié de ligne) pris en compte pour qualifier la reprise sont différents en fonction du type de manœuvre à effectuer lors de la reprise en main (changement de voie ou maintien dans la voie).

L'objectif principal des travaux de cette thèse est de déterminer quels paramètres physiologiques et comportementaux seraient capables d'expliquer et de prédire la dangerosité de la reprise en main du véhicule dans le cadre de la conduite autonome de niveau 3 chez des sujets sains.

Les objectifs secondaires sont d'identifier des paramètres physiologiques et comportementaux, capables de prédire le temps de réponse (TOT) du véhicule, et de déterminer si la nature des tâches effectuées en conduite autonome (NDRT) est associée au temps de réponse (TOT) et à la dangerosité de la reprise en main du véhicule.

En termes d'amélioration des connaissances, cette étude va permettre d'identifier des paramètres physiologiques et comportementaux capables de prédire la capacité de réengagement dans une tâche cognitive, en l'occurrence la conduite automobile.

## **CHAPITRE 2: METHODE**



# 1. Population étudiée

Dans le cadre de cette thèse, nous avons conduit l'étude ANTIDOTE. Trente-deux participants sains (16 hommes, 16 femmes), âgés entre 23 et 72 ans ( $M = 42.95$ ,  $SD = 16.36$ ), avec une expérience de conduite comprise entre 4 et 54 ans ( $M = 23.31$ ,  $SD = 16.86$ ), ont participé à l'expérimentation. Tous les participants ont le permis de conduire et conduisent régulièrement ( $M = 15200\text{km/an}$ ,  $SD = 8931$ ). L'essai clinique (N° ID-RCB : 2019-A01524-53), a reçu l'avis favorable du Comité de Protection des Personnes EST 1, et a été déclaré au répertoire Clinical Trials (N° NCT04188626).

Les participants ont un IMC compris entre 18 et 27 ( $M = 23.59$ ,  $SD = 2.46$ ). Tous les participants ne devaient pas avoir d'addiction (alcool, caféine/théine, ou autres substances), pas d'atteinte neurocognitive majeure (score au Mini Mental State Examination = 30, (Folstein et al., 1975)). Tous les sujets présentant des plaintes de sommeil (score au Basic Nordic Sleep Questionnaire  $\leq 3$ , questionnaire de 21 items, (Partinen and Gislason, 1995)), de somnolence diurne subjective (score à l'échelle d'Epworth  $\leq 11$ , questionnaire de 8 items, (Johns, 1991)), de perturbation psychologique au niveau de l'anxiété et la dépression (Symptom Checklist-90 items-Revised (SCL 90 -R), questionnaire de 90 items, (Derogatis, 1986)), de comorbidités psychiatriques (vérifiées lors d'un entretien clinique), de pathologies endocriniennes non-contrôlées (dysthyroïdie, diabète), d'affections cardio-vasculaires évolutives, et d'affections neurologiques évolutives traitées ou non, ont été exclus de l'étude. Les participants ne devaient pas être des conducteurs professionnels et devaient être titulaires de leur permis de conduire depuis au moins un an. Ils devaient également déclarer ne pas avoir de problème d'acuité visuelle, sinon corrigée avec des lentilles, et de daltonisme.

## 2. Design de l'étude

### 2.1. Déroulement de l'étude

L'étude ANTIDOTE se décompose en deux visites.

La première visite, dite Visite d'inclusion (V0), est décomposée en deux parties. La première partie était destinée au recueil de consentement du participant et à la vérification des critères d'éligibilité (0). La seconde partie de la visite était une session d'habituation à la conduite autonome sur simulateur, dans le but de vérifier que le participant était capable de maîtriser le véhicule et ses commandes, de comprendre le principe de reprise de conduite manuelle dans le cadre d'une conduite automatisée de niveau 3, et de se familiariser avec la conduite sur simulateur. Nous avons également vérifié à cette occasion que le participant n'avait pas de symptômes du mal du simulateur (Stoner et al., n.d.).

La session d'habituation se décompose en 4 épisodes de conduite de 2 minutes, 5 minutes, 10 minutes et 15 minutes, dans lesquels il était demandé au volontaire d'effectuer respectivement 0, 1, 2 et 3 reprises de conduite manuelle. Le trafic routier, absent lors de la 1ère et de la 2ème session, augmente progressivement dans la 3ème et dans la 4ème session. Entre chaque épisode de conduite, le sujet dispose d'une pause de 5 minutes hors de l'environnement de conduite pour compléter le SSQ (Bouchard et al., 2007), une échelle d'auto-évaluation des symptômes du mal du simulateur (16 items, score total  $\leq 10$ ). A la fin de la visite, si le participant est éligible aux critères d'inclusion et d'exclusion de l'étude, il lui est demandé de se présenter à la deuxième visite dans les deux semaines après la V0.

Lors de la deuxième visite, dite Visite Expérimentale (V1), le volontaire a réalisé deux sessions de conduite, précédées d'une session « Baseline » d'enregistrement de son état physiologique de base (état au repos). Des enregistrements de paramètres physiologiques et comportementaux (électrocardiographiques (ECG), électroencéphalographiques (EEG) et oculomoteurs (OM)) pour les trois sessions, ainsi que des mesures de performance de conduite pour les deux sessions de conduite, sont effectués.

Durant l'enregistrement « Baseline » d'une durée de 5 minutes, le sujet, équipé de capteurs (ECG), électroencéphalographiques (EEG) et oculomoteurs (EYE), est installé dans le simulateur de conduite. Des consignes demandant de se détendre, de bouger le moins possible, et de ne pas fermer les yeux (clignements acceptés), lui sont données.

La fin de la session Baseline nous mène à la première session de conduite. Celle-ci se déroulait à travers un scénario de 40 minutes où le sujet roulait dans le sens trigonométrique (antihoraire) de la boucle d'autoroute. La seconde était composée d'un scénario de 60 minutes où la conduite s'effectuait dans le sens horaire de la boucle d'autoroute. Après chaque session, le sujet disposait d'une pause de 15 minutes en dehors de l'environnement de conduite afin de compléter à nouveau le SSQ et de se soulager si nécessaire. Chaque session de conduite a commencé par de la conduite automatisée à une vitesse de 130 Km/h.

Six NDRTs sont effectuées de façon aléatoire au cours de chaque session de conduite :

Une conversation simulée (Conversation). Une bande audio, dans laquelle sont énoncées des questions préenregistrées issues du questionnaire Medical Outcome Study Short Form - 36 (MOS SF-36) (Ware and Ware, 2018) et des questions de la vie quotidienne (ex : Combien de temps vous faut-il pour vous préparer le matin ?), défile, et il est demandé au volontaire de répondre aux questions.

Un jeu vidéo (Jeu). Le sujet effectue un jeu vidéo de type « Puzzle » sur la tablette disponible dans l'habitacle.

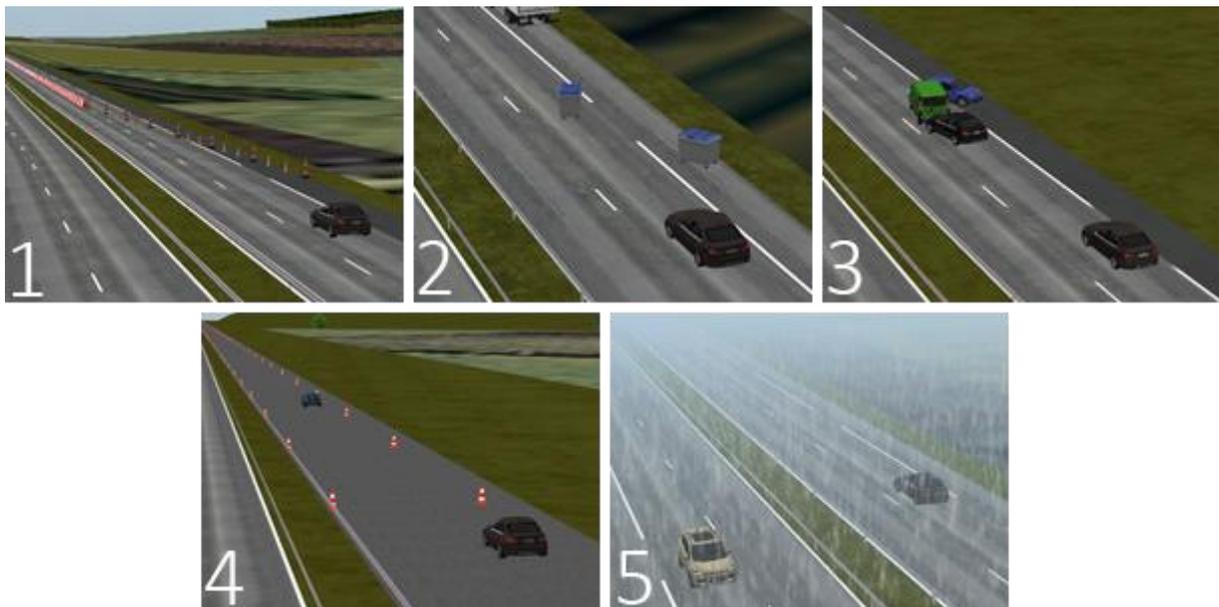
La lecture d'un livre/magazine (Lecture). Le participant devait lire un livre apporté par ses soins. Si le participant oubliait d'apporter son livre, le livre « le Horla » de Guy de Maupassant ou un magazine scientifique portant sur l'archéologie lui était proposé.

L'écoute de la radio (Radio). A travers la tablette, une page internet composée d'un grand nombre de stations radio est présentée au participant. Le sujet devait choisir une radio à laquelle il portait de l'intérêt et devait l'écouter.

La visualisation d'une vidéo (Vidéo). A travers la tablette, le participant regardait soit une vidéo de bandes annonces de films récents soit un reportage sur l'espace.

Manger/boire (Manger). Le sujet dispose de bretzels, d'une pomme, et a accès à une bouteille d'eau de 50cl.

Alors que le participant effectue les différentes NDRTs présentées précédemment, six événements sont présents sur la route, provoquant une demande de reprise en main du véhicule par le conducteur. Les deux scénarii sont composés de deux zones de travaux situées sur la voie de droite, un accident situé sur la voie de droite, un obstacle sur la route situé sur la voie de droite, une absence totale de marquage au sol, et la survenue de conditions météorologiques difficiles (pluies torrentielles avec brouillard).



**Figure 9 : Les différents événements composant les deux scénarii de conduite (1 - Travaux, 2 - Obstacle, 3- Accident, 4 - Absence de marquage au sol, 5 Conditions météorologiques difficiles).**

Les événements « TRAVAUX », « OBSTACLE », et « ACCIDENT » impliquent un changement de voie afin d'éviter l'obstacle. Les événements « ABSENCE DE MARQUAGE AU SOL » et « METEO » impliquent un maintien du véhicule dans la voie. La chronologie et la disposition des événements dans chacun des scénarii est fixe mais différentes entre elles.

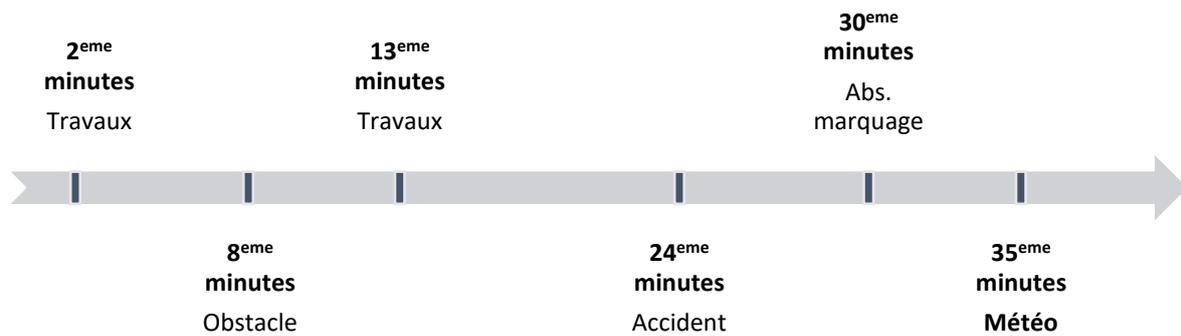


Figure 10 : Chronologie des évènements du scénario 1 - 40minutes

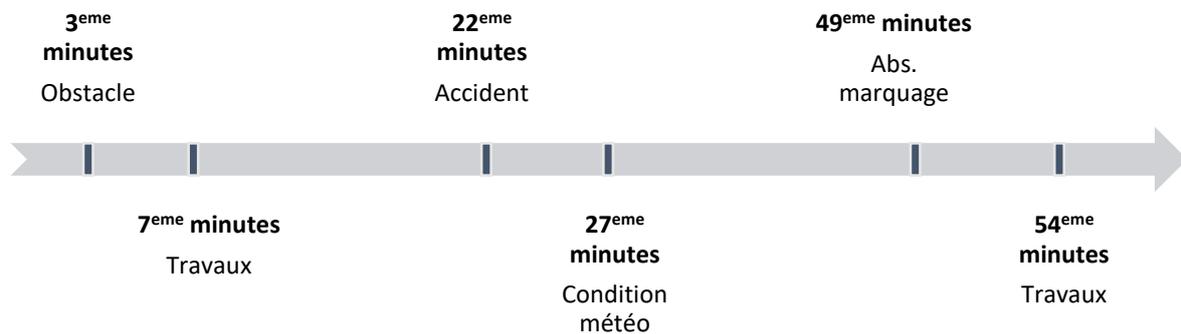


Figure 11 : Chronologie des évènements du scénario 2 - 60minutes

Lorsque l'un de ces évènements apparaît, une voix féminine synthétique (Bazilinsky and de Winter, 2017) demande la reprise en main du véhicule (TOR) par le conducteur : « Reprenez le volant ». Le sujet a alors 8 secondes (TB) pour se désengager de la NDRT en cours, reprendre en main le véhicule en appuyant sur le bouton du comodo de gauche, mettre ses mains sur le volant, et gérer la situation environnante (Mok et al., 2015). A la suite de l'appui du bouton, le véhicule annonce le passage à la conduite manuelle en annonçant vocalement : « Vous avez le contrôle du véhicule ». Le conducteur doit effectuer la manœuvre afin d'éviter sans encombre l'évènement. Lorsque l'évènement est passé, une demande au conducteur de déléguer la conduite est annoncée : « Déléguez la conduite ». Le conducteur doit alors appuyer une nouvelle fois sur le bouton situé à l'extrémité du comodo de gauche. Afin de confirmer la délégation de la conduite, le véhicule annonce : « Conduite autonome activée ». Le sujet peut donc reprendre la NDRT qu'il effectuait avant la demande de reprise en main du véhicule.

Pour la session de conduite de 40 minutes, chaque reprise est espacée entre 5 et 11 minutes avec un engagement dans la NDRT d'une durée alors comprise entre 2 et 11 minutes. Pour la session de conduite de 60 minutes, chaque reprise est espacée entre 4 et 22 mn avec un engagement dans la NDRT d'une durée alors comprise entre 3 et 22 minutes.

## 3. Outils de simulation

### 3.1. Le simulateur de conduite

Les sessions de conduites autonomes simulées ont été effectuées sur le simulateur de conduite automobile de l'EquipEx PHENOVRT (ANR-10-EQPX-012-01), localisé au SANPSY sur la Plateforme de Recherche Neuro-Psychopharmacologique, hébergé au CHU de Bordeaux.

Il a été développé en collaboration avec Oktal et Continental Automotive. C'est un équipement de type Fullcab, composé de l'habitacle d'un véhicule réel (Peugeot 2008), de son poste de conduite (avec boîte de vitesses manuelle) et de son instrumentation avec retour haptique sur le volant et les pédales.

Le simulateur est en mesure de simuler fidèlement la conduite dans n'importe quel environnement en tenant compte de l'interaction entre comportement du conducteur, comportement de la voiture, et de tout ce qui l'entoure. La projection de la simulation est assurée par 3 vidéoprojecteurs BenQ W1070 pouvant chacun afficher une image en 1080p (1920x1080). L'image est projetée sur un écran blanc de 2m50 de haut englobant le véhicule sur 230°. Un système audio émet le son de l'environnement de conduite et du trafic au sein du simulateur de conduite à travers les haut-parleurs de l'habitacle. Le système audio permet également de communiquer avec la salle de contrôle, pièce où est supervisée la simulation de conduite. Une tablette de 10'', installée sur le tableau de bord du simulateur, est utilisée comme une Interface Homme-Machine (IHM). Le logiciel de contrôle et conception de la simulation est SCANer Studio 1.8.



Figure 12 : *Simulateur de conduite, vue intérieure et extérieure (Peugeot 2008)*

### 3.2. Le poste de contrôle

Le poste de contrôle est la pièce où est géré le fonctionnement global de la simulation de conduite. C'est ici que sont assurés le développement de l'environnement de conduite, les scénarii et la supervision de la simulation. Le poste est également équipé d'un micro permettant de communiquer directement avec le conducteur au sein du véhicule.



**Figure 13 : Vue globale de la salle de contrôle du simulateur de conduite (matériel mis en place pour l'enregistrements des paramètres physiologiques et comportementaux et celui des performances de conduite).**

## 4. Conception des scénarii de conduite

### 4.1. Cartographie de la conduite

La carte sur laquelle se déroule la simulation de conduite représente une boucle d'autoroute d'une longueur de 50km. Les deux sens de circulation sont praticables et sont composés d'une route à double voies. Le paysage de cette carte représente de longues plaines, avec des virages très légers limitant le mal du simulateur chez le conducteur durant la conduite.

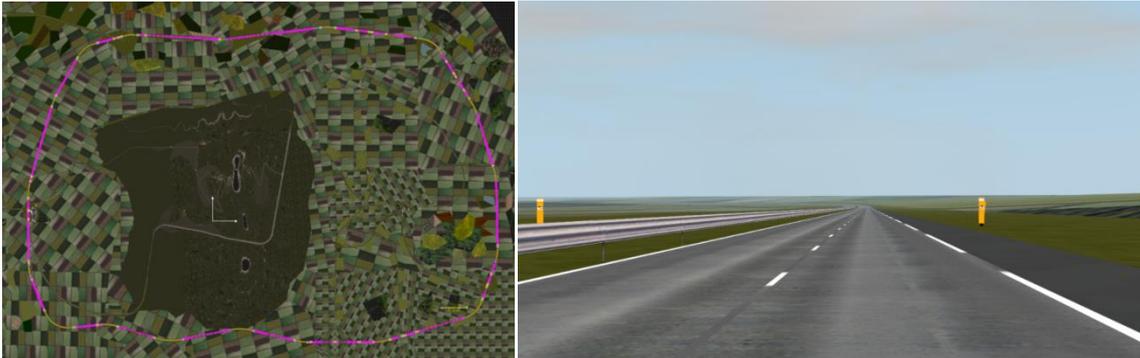


Figure 14 : Boucle d'autoroute et l'environnement de conduite.

### 4.2. Environnement de développement (SCANeR Studio)

Les scénarii de conduite ont été développés sur le logiciel de simulation SCANeR Studio 1.8, une plateforme logicielle complète consacrée à la simulation automobile et au transport, destinée à tester et valider les aides à la conduite (Advanced Driver-Assistance Systems - ADAS), les véhicules autonomes, l'interaction Homme-Machine, ou le développement de solutions d'éclairage. SCANeR studio (Dovgan, 2017) fournit tous les outils et modèles nécessaires pour construire un monde virtuel très proche de la réalité : routes, véhicules dynamiques, trafic, capteurs, conducteurs réels ou virtuels, éclairages, conditions météorologiques et génération de scénarii. Loin d'être un outil « boîte noire », c'est une plateforme modulable, flexible et ouverte, répondant aux besoins des chercheurs et des ingénieurs. Sa polyvalence permet une gamme complète de configurations possibles : simulateurs de conduite, modèle intégré (MIL), logiciel intégré (SIL), matériel intégré (HIL). L'interface principale de SCANeR studio permet aux utilisateurs de configurer, préparer et exécuter la simulation ou d'analyser les résultats.

SCANeR studio est organisé autour du workflow de simulation suivant : un mode TERRAIN pour la préparation et la modélisation de la route et du terrain, un mode VEHICULE pour la préparation et la modélisation des modèles de véhicules, un mode SCÉNARIO pour régler les conditions initiales et les différents événements de script, un mode SIMULATION pour exécuter et surveiller la simulation et un mode ANALYSE pour rejouer et analyser les données enregistrées.

### 4.3. Rédaction des scénarii

Les scénarii de conduite regroupent un enchaînement d'actions réalisées automatiquement ou avec l'intervention du participant. La chronologie de chaque scénario de conduite est dirigée par un script. Ces scripts sont l'élément principal des scénarii de conduite, car ce sont eux qui permettent le contrôle total des événements pouvant intervenir durant la conduite. La gestion du trafic, l'apparition ou la

disparition d'objets, l'administration des consignes vocales de demande de reprise en main ou de délégation de la conduite, le calcul en temps réel de variables explicatives, sont des exemples d'actions contrôlées par le script. Chacun de nos deux scripts est composé de fonctions « Task », représentant les 6 évènements nécessitant la reprise de conduite à effectuer par le conducteur. Dans ces « Task » se trouvent des sous-fonctions d'exécutions appelées « Rules ». Ces règles effectuent des actions en fonctions de différents paramètres renseignés au préalable.

La Figure 15 représente une partie du script du scénario 40 minutes. Ce morceau de script décrit l'enchaînement d'exécution de plusieurs règles. Ces règles décrivent la demande vocale de reprise en main par le système autonome, la reprise de conduite manuelle effectuée par le conducteur, la demande vocale de délégation de la conduite par le système de conduite autonome et l'activation de la conduite automatisée.

```

RULE_1.1 : Demande reprise de conduite
├─ IF getCartesianDistance ([1] 1_debut_condition_de_reprise, [0] ExecutiveCar) <= 293.3 BECOMES TRUE
├─ THEN setVariable (TOR_Baseline, getTaskClock ())
├─ THEN addTimeMarker (40 - TOR 1 - Demande, "", "")
├─ THEN setSoundPlay (1, ONCE)
└─ THEN setVariable (Lateral_Shift, getRoadLateralShift (0, CENTER))
    └─ getRoadLateralShift (0, CENTER)

RULE_1.2 : Reprise manuelle du conducteur
├─ IF getVehicleAutonomousMode (0, BOTH) = 0 BECOMES TRUE
├─ THEN addTimeMarker (40 - TOR 1 - Reprise, "", "")
├─ THEN setVariable (TOR (Time Of Request), getTaskClock () - TOR_Baseline)

RULE_1.3 : Demande reprise autonome
├─ IF getCartesianDistance ([0] ExecutiveCar, [2] 1_fin_de_condition_de_reprise) <= 5 BECOMES TRUE
├─ getCartesianDistance ([0] ExecutiveCar, [2] 1_fin_de_condition_de_reprise)
├─ THEN setSoundPlay (3, ONCE)

RULE_1.4 : Reprise autonome effectuée
├─ IF [ getCartesianDistance ([0] ExecutiveCar, [2] 1_fin_de_condition_de_reprise) < getCartesianDistance ([0] ExecutiveCar, [1] 1_debut_condition_de_reprise) ]
├─ getCartesianDistance ([0] ExecutiveCar, [2] 1_fin_de_condition_de_reprise) < getCartesianDistance ([0] ExecutiveCar, [1] 1_debut_condition_de_reprise)
├─ getVehicleAutonomousMode (0, BOTH) = 1 BECOMES TRUE
├─ THEN addTimeMarker (40 - TOR 1 - Délégation, "", "")
└─ THEN setVariable (TOR (Time Of Request), 0)

```

Figure 15 : Aperçu du script du scénario (durée 40 minutes) représentant la procédure de reprise et de délégation de la conduite.

## 4.4. Les évènements

Les évènements « TRAVAUX », « OBSTACLE », « ACCIDENT », et « METEO » ont été réalisés à partir de la base d'objets 3D disponible directement dans SCANer Studio 1.8. Cette banque d'objets 3D dispose de nombreux objets liés au trafic routier, notamment des véhicules légers et lourds, véhicules de travaux, panneaux signalétiques, plots, etc....

Pour la conception de l'évènement « ABSENCE DE MARQUAGE AU SOL », des modifications ont dû être apportées à l'environnement de conduite pour créer deux portions sans marquage au sol. Pour cela, la création d'un plan aux dimensions de la portion de route choisi pour l'évènement a été réalisé sous le logiciel 3DSMax 2018. Une texture 2D représentant une route sans marquage a été réalisée grâce au logiciel Photoshop CC 2018. L'application de cette texture sur le plan a été réalisée avec le logiciel 3DSMax 2018. Afin d'exporter les modifications apportées à la carte, nous avons utilisé à travers ce dernier, le plugin OpenSceneGraph Max afin d'effectuer l'export (.osg) de la maquette 3D vers SCANer Studio 1.8. Le plan réalisé superpose ainsi la route d'origine.

## 4.5. Le trafic routier

Le trafic routier est composé de 15 véhicules circulant autour de celui du participant. Ces véhicules disparaissent et réapparaissent dans le sens de circulation du véhicule du sujet ou dans le sens inverse afin d'avoir un trafic continu autour du véhicule du participant. Un véhicule environnant disparaît lorsqu'il se trouve à un rayon de 1000 mètres derrière et 1500 mètres devant le véhicule du sujet. Il

réapparaît dans un rayon de 750 mètres derrière et 1000 mètres devant le véhicule du participant. Ces rayons sont suffisants pour que le sujet n'aperçoive pas visuellement la disparition ou l'apparition des véhicules environnants. Les véhicules environnants circulent à des vitesses variées à  $130 \pm 5$  km/h, l'objectif étant de créer des dépassements entre les véhicules pour créer une dynamique de conduite. Le véhicule du sujet en mode autonome, peut également effectuer un dépassement si besoin.

## **4.6. La voix du simulateur de conduite**

Pour créer les demandes vocales pour la reprise et la délégation de la conduite, nous avons utilisé Balabolka, qui est un logiciel de synthèse vocale (Text-To-Speech) gratuit qui permet à l'ordinateur de lire un texte avec différentes voix, masculines ou féminines et dans plusieurs langues et de le convertir en fichier audio (.mp3). Un menu "Configuration" permet de changer plusieurs paramètres de lecture tels que le timbre de la voix, la vitesse ou la correction de la prononciation.

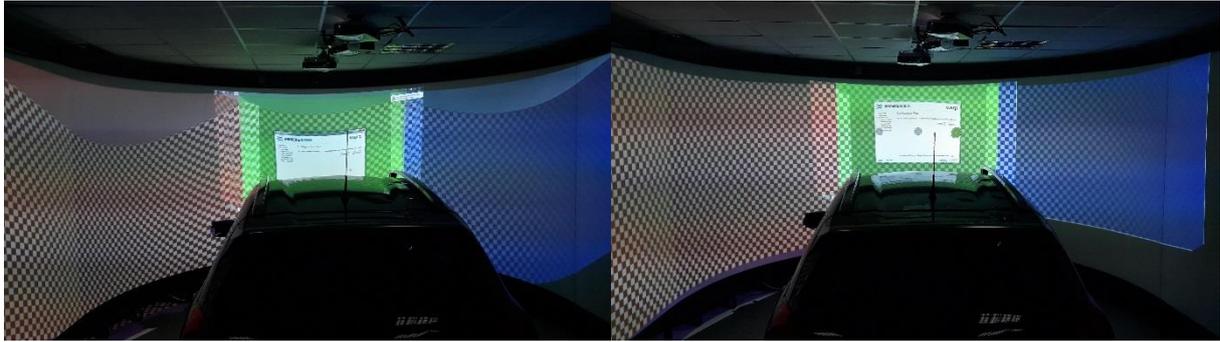
## **4.7. Interaction avec la tablette et communication**

Comme expliqué dans la partie « design de l'étude », le participant doit effectuer des NDRTs lors des sessions de conduite. Certaines d'entre elles sont exécutées sur une tablette. Afin de certifier le bon démarrage et le bon déroulement de ces NDRTs, un opérateur situé dans la salle de contrôle pilote à distance la tablette. Il est chargé de démarrer les différentes NDRTs à la place du participant. Ce contrôle à distance de la tablette est assuré par le logiciel TeamViewer, un logiciel de télémaintenance. Ce logiciel permet également à l'opérateur de communiquer avec le participant depuis la salle de contrôle à travers la tablette en cas d'annonce de consigne, de problème ou pour toute autre demande particulière.

## **4.8. Aménagements liés au contexte du mal du simulateur**

Le Simulator Sickness ou mal du simulateur est un type de mal des transports. Il peut être provoqué par le non-mouvement en lien avec la projection de l'environnement virtuel dans un simulateur. A titre d'exemple, dans un simulateur à plateau fixe, l'énergie cinétique lors d'un freinage amenant le corps du conducteur à aller vers l'avant n'existe pas. Cela crée un conflit entre le système vestibulaire et le système visuel, qui mène entre autres à des symptômes comme l'inconfort visuel, la conscience de l'estomac, des nausées, des vomissements et de la fatigue.

Avec l'objectif d'atténuer au maximum les effets de la conduite simulée sur l'état général du sujet, plusieurs aménagements ont, dans la mesure du possible, été mis en place au sein de notre environnement de simulation en prenant en compte les recommandations trouvées dans la littérature (Stoner et al., n.d.). En plus de la nécessité de mettre en place une procédure d'habituation dans notre étude, Stoner explique qu'une résolution trop faible implique un inconfort sur la vue. Nous avons augmenté la résolution des 3 vidéoprojecteurs en Full HD (Résolution finale : 5760 x1080). Afin de réadapter l'affichage en 2D des vidéoprojecteurs sur le mur de projection en 3D, une adaptation de l'image (mapping) a été réalisée. Cette méthode consiste à déformer la projection d'une image dans le but de l'adapter sur une surface non plane.



**Figure 16 : Utilité de la méthode du mapping. L'image de gauche montre l'affichage brut et déformé sur le mur de projection. L'image de droite montre l'affichage adapté à la forme du mur de projection grâce au mapping.**

L'allègement de la carte, c'est-à-dire la suppression d'objets 3D non-indispensables, réduit considérablement les calculs de coordonnées et d'affichages d'objets dans l'environnement 3D. Ce travail a été réalisé afin d'assurer un framerate constant à 60fps et d'assurer un délai de rafraîchissement de l'image confortable (15ms). La température dans le simulateur a un impact sur le bien-être du conducteur. La salle de notre simulateur est climatisée et suit les recommandations établies, c'est-à-dire une température préconisée à 70°F (21°C).

# 5. Synchronisation des enregistrements des différents paramètres

## 5.1. Principe de fonctionnement

RTMaps est un logiciel de développement pour des systèmes traitant de multiples capteurs de différents types tels que des flux vidéo, LiDAR, GPS, gyromètres, accéléromètres etc... Il fournit des fonctionnalités telles que le développement modulaire, la programmation graphique, associées à des fonctionnalités utiles pour la phase de prototypage, comme l'enregistrement synchronisé et la relecture des données des capteurs, grâce à une capacité d'horodatage avancée. Il est aujourd'hui largement utilisé dans des domaines comme la robotique ou encore le milieu automobile (Du Lac et al., 2008).

Nous utilisons RTMaps pour la synchronisation d'enregistrements de données. Ces enregistrements sont organisés à travers une architecture modulaire appelé diagramme. Ce diagramme est composé de blocs de constructions indépendants, également appelés « composants RTMaps », fournissant des fonctionnalités intégrées pour capter et enregistrer des flux de données obtenues à partir de différents capteurs. Chaque composant RTMaps est caractérisé par des ports d'entrées recevant les données, qui sont filtrées afin de vérifier si le type de donnée en entrée est le type attendu, des sorties produisant des données d'un type voulu (image, CAN (Controller Area Network), Vecteurs, matrices etc...), des propriétés permettant de configurer dynamiquement le composant lors de son exécution (spécification des paramètres d'algorithmes, des appareils à adresser, etc...), et par des actions qui peuvent être déclenchées à tout moment par l'utilisateur et aboutir à un appel de fonction dans le code du composant. Une sortie peut être connectée à plusieurs entrées d'autres composants et une entrée ne peut être connectée qu'à une seule production.

RTMaps permet d'effectuer des enregistrements synchronisés sur plusieurs ordinateurs, et d'échanger des données entre différentes instances de RTMaps. Une communication entre les différents ordinateurs est mise en place à travers un réseau TCP/IP.

La synchronisation d'enregistrements est basée sur la synchronisation d'horloges basée sur adresse IP, avec un « Maître » et N « Esclaves ». La notion de « maître » désigne le diagramme d'enregistrement qui émet à son lancement le signal/ordre de démarrer ou stopper les enregistrements aux diagrammes esclaves. La notion d'Esclave désigne un diagramme recevant l'ordre de démarrer l'enregistrement par le diagramme Maître.

La synchronisation de nos enregistrements est composée d'un ordinateur sur lequel est lancé le diagramme maître, permettant l'acquisition des données CAN du simulateur de conduite, et de 3 ordinateurs sur lesquels est respectivement lancés un diagramme pour l'acquisition de données de l'Eye-tracking, de l'ECG et de l'EEG (Figure 17).

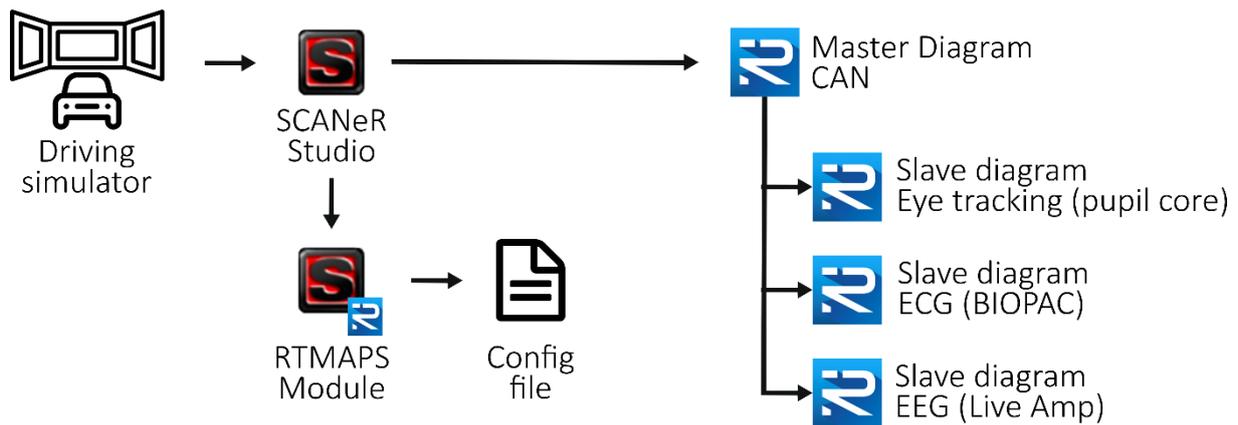


Figure 17 : Architecture générale de l'acquisition synchronisée des données CAN, ECG, Eyetracking et EEG.

Afin de rendre opérationnelle la synchronisation des enregistrements, le diagramme d'acquisition « Maître » est implanté à travers la création d'un module dans SCANeR Studio 1.8. Ce module est lancé au démarrage de la simulation de conduite et exécute l'enregistrement du diagramme maître. A l'exécution de l'enregistrement, le signal de synchronisation est envoyé aux ordinateurs esclaves pour lancer leurs enregistrements respectifs. La synchronisation est opérationnelle.

## 5.2. Synchronisation et acquisition des enregistrements des données de performances de conduite et des paramètres physiologiques

Comme énoncé précédemment (Chapitre 2:5.1), chaque système d'acquisition des différents paramètres sélectionnés possède son propre diagramme sous RTMaps. L'acquisition est différente suivant le système. Cela est dû aux caractéristiques et fonctionnements propres de ces derniers. Les diagrammes d'acquisition sont donc très différents en fonction du système.

### 5.2.1. Données de performances de conduite (CAN)

Ici se trouve le cœur de la synchronisation des enregistrements des différents appareils. Le diagramme d'acquisition des données CAN est le « Maître ». Il est lancé à travers le module RTMaps dans SCANeR Studio, et lors de son exécution, envoie un signal aux diagrammes « Esclaves » afin qu'ils s'exécutent à leur tour.

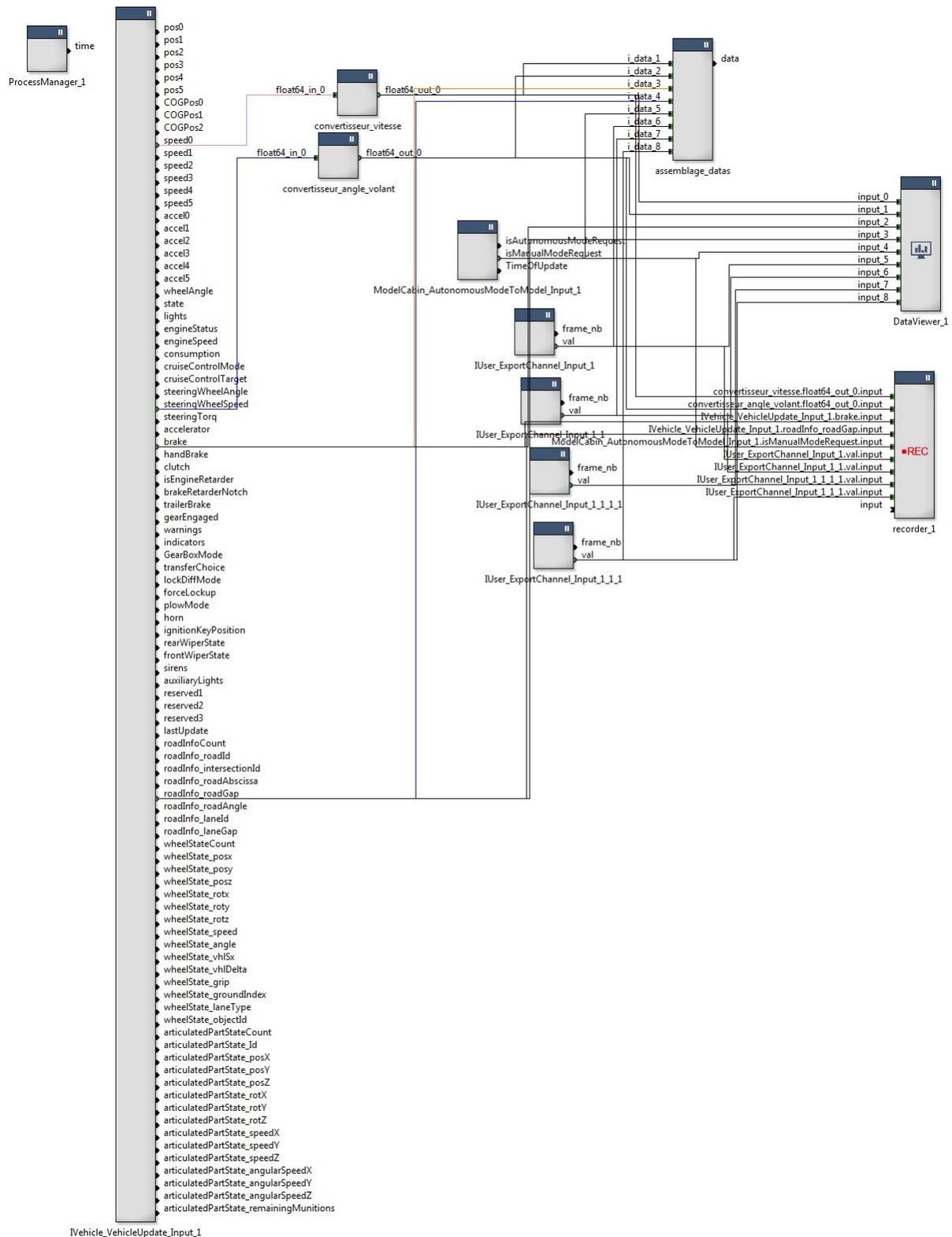


Figure 18 : Diagramme d'acquisition des données CAN sur RTMaps

Ci-dessus est représenté le diagramme d'acquisition des données CAN. Tout d'abord le composant vital à la communication entre RTMAPS et SCANer studio se nomme « ProcessManager », obtenu à l'installation du package « SCANer\_Controller.pck (1.8) ». Ce composant établit la communication entre le diagramme et SCANer Studio. Il renseigne via un fichier de configuration (.cfg) les différents canaux de données (channel) à enregistrer. Le nom, l'index du véhicule du sujet dans la simulation de

conduite, la méthode de communication, l'attribut, l'échelle et l'offset sont renseignés pour chaque Channel.

```
#Inputs definition
# An input definition is made of 6 fields (space separated)
# 1 - RTMaps input name (no spaces, no special charaters)
# 2 - Vehicle index to listen from / send to
# 3 - method : set of 3 string parameters defining the communication type (Shm or
# Network), the interface name (ex: SteeringCabin), the method (ex : CabToSteering)
# 4 - attribute (ex : Steeringwheel)
# 5 - scale factor
# 6 - offset

[inputs]

[outputs]
speed 0 Network/Ivehicle/VehicleUpdate speed 1 0
brake 0 Network/Ivehicle/VehicleUpdate brake 1 0
accelerator 0 Network/Ivehicle/VehicleUpdate accelerator 1 0
steeringwheelSpeed 0 Network/Ivehicle/VehicleUpdate steeringwheelspeed 1 0
brake 0 Network/Ivehicle/VehicleUpdate brake 1 0
roadGap 0 Network/Ivehicle/VehicleRoadInfo roadGap 1 0
isManualModeRequest 0 Shm/ModelCabin/AutonomousModeToModel isManualModeRequest 1 0
0 0 Network/Iuser/ExportChannel 0 1 0
1 0 Network/Iuser/ExportChannel 1 1 0
2 0 Network/Iuser/ExportChannel 2 1 0
3 0 Network/Iuser/ExportChannel 3 1 0
```

Figure 19 : Fichier de configuration

Un autre composant nommé « IVehicle\_VehicleUpdate\_Input », provenant du package « SCANeR\_IVehicle.pck (1.8) », est utile pour acquérir les données provenant des performances de conduite telles que la vitesse, le frein, la position du véhicule dans la voie, la vitesse et la vitesse de rotation du volant. Les deux dernières sont chacune reliées à un composant, un « Unit\_convertir », afin de convertir la vitesse, initialement en mètre par seconde (m/s), vers des kilomètres par heure (km/h), et la vitesse de rotation du volant, initialement en radian par seconde (red/s), vers des degrés par seconde (°/s). Le composant « ModelCabin\_AutonomousModeToModel\_Input », provenant du package « SCANeR\_ModelCabin.pck (1.8) », est utilisé pour recueillir l'information d'activation ou désactivation du mode autonome de la conduite. Quatre composants nommés « User\_Export\_Channel » permettent l'acquisition de variables calculées (TTC, TOT, la position latérale du véhicule dans la voie) au sein du scénario de conduite dans SCANeR Studio. Toutes les sorties des composants cités précédemment sont reliées aux entrées d'un composant « RecFile » pour l'enregistrement des différentes données acquises. Le répertoire de sortie, le format et la précision du temps, le séparateur et le format du fichier de sortie y sont communiqués pour chaque entrée. La fréquence d'acquisition des données est de 10 Hz.

## 5.2.2. Électrocardiogramme

Pour l'acquisition des données de l'ECG, l'installation de BHAPI (Biopac Hardware API License) a été nécessaire. C'est une licence permettant au BIOPAC de communiquer avec un logiciel tiers (ici RTMaps). Au niveau de la conception du diagramme, le package « rtmaps\_biopac.pck (1.2.0) » dans RTMaps, développé par Intempora, contenant les différents composants est nécessaire à la communication avec le BIOPAC et à l'acquisition des signaux. Une fois les installations effectuées, nous pouvons partir sur la construction de notre diagramme.

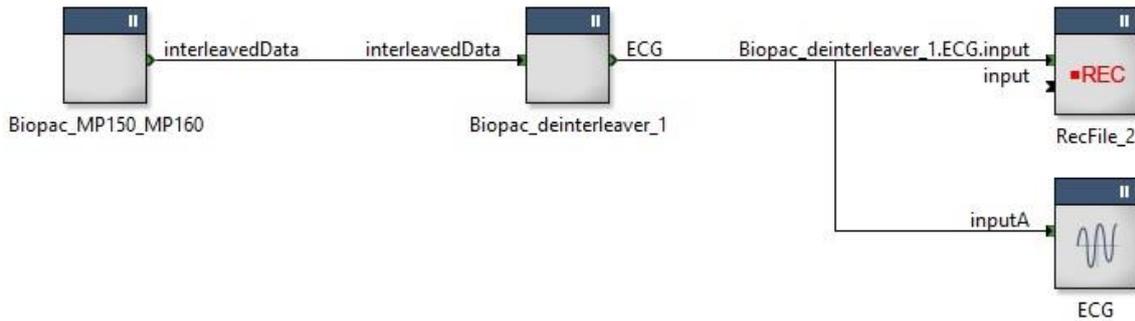


Figure 20 : Diagramme d'acquisition des données de l'ECG sur RTMaps.

Ci-dessus est représenté le diagramme d'acquisition des signaux ECG à travers RTMaps. Le Composant Biopac\_MP150\_MP\_160 permet la connexion au système BIOPAC par le biais du numéro de série de ce dernier, et l'acquisition des données brutes de l'ECG par le boîtier BIONOMADIX sans fil. La fréquence d'échantillonnage et la sélection du Channel ECG sont instaurées dans ce composant.

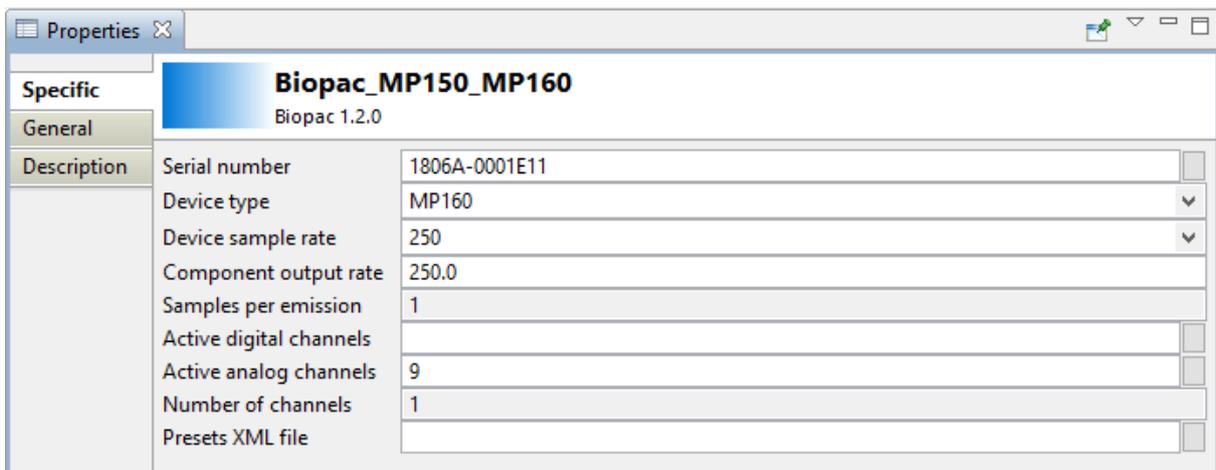


Figure 21 : Propriétés du composant Biopac\_MP150\_MP\_160

La sortie du composant est reliée à l'entrée d'un autre composant, le Biopac\_Deinterleaver\_1. Ici, le nommage du Channel ECG est effectué. La sortie du composant est liée à l'entrée de deux autres composants, le premier est un Oscilloscope, afin de visualiser en temps réel les données acquises. Le second composant est destiné à l'enregistrement des données. Le répertoire de sortie, le format et la précision du temps, le séparateur et le format du fichier de sortie y sont communiqués. La fréquence d'acquisition des données est de 250 Hz.

### 5.2.3. Électroencéphalogramme

Pour les données de l'EEG, l'acquisition est effectuée par OpenViBE, une plate-forme logicielle gratuite et open source dédiée à la conception, au test et à l'utilisation d'interfaces cerveau-ordinateur. C'est un logiciel pour les neurosciences en temps réel (c'est-à-dire pour le traitement en temps réel des signaux cérébraux). Il peut être utilisé pour acquérir, filtrer, traiter, classer et visualiser les signaux cérébraux en temps réel. OpenViBE comprend également un outil d'analyse hors ligne ou par lots de grands ensembles de données. OpenViBE est un logiciel gratuit et open source.

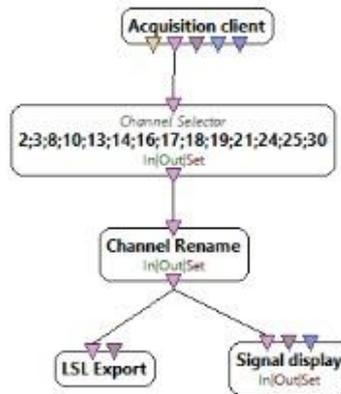


Figure 22 : Diagramme d'acquisition des données de l'EEG sous OpenViBE et RTMaps.

Dans un mode de fonctionnement similaire à RTMaps, OpenViBE acquiert, filtre et organise les données de l'EEG à travers un diagramme, constitué de composants reliés entre eux. Ci-dessus est représenté le diagramme d'acquisition des signaux EEG à travers OpenViBE. A travers le composant nommé « Acquisition Client », la connexion avec le casque EEG LiveAmp est effectuée grâce au numéro de série de ce dernier. Ce composant est lié à un autre composant, le « Channel selector », destiné à sélectionner les différentes régions du cerveau souhaitées à travers les électrodes (Channels) du casque. Celui-ci est relié à un autre composant pour le renommage des Channels sélectionnés. Ce composant, aussi appelé boîte, est reliée à deux autres boîtes, l'une permettant l'affichage des signaux sélectionnés en temps réel et une seconde boîte pour l'export en temps réel des signaux via un protocole LSL (Lab Streaming Layer). Le composant « LSL Export » fait le lien avec RTMaps pour permettre la synchronisation des signaux de l'EEG avec ceux des autres systèmes.

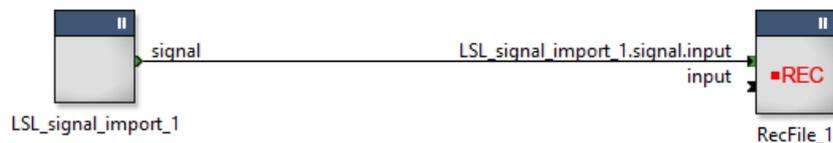


Figure 23 : Diagramme d'import de RTMaps des données de l'EEG acquises par OpenViBE

Ci-dessus est représenté le diagramme de RTMaps, pour l'import et l'enregistrement des signaux EEG acquis par OpenViBE. Le composant RTMaps nommé « LSL\_signal\_import », provenant du package « LSL\_rtmaps » développé par SANPSY, communique à avec le composant « LSL export » du diagramme d'OpenViBE. Il est relié au composant « RecFile » pour l'enregistrement des signaux EEG. Le répertoire de sortie, le format et la précision du temps, le séparateur et le format du fichier de sortie y sont communiqués. La fréquence d'acquisition des données est de 250 Hz.

#### 5.2.4. Eye-Tracking

Tout d'abord, l'installation du package `rtmaps_pupilcore.pck` (1.2.0) dans RTMaps, développé par SANPSY, était indispensable. Ce package contient les différents composants nécessaires à la communication avec le logiciel « Pupilcore », et donc à l'acquisition des signaux.

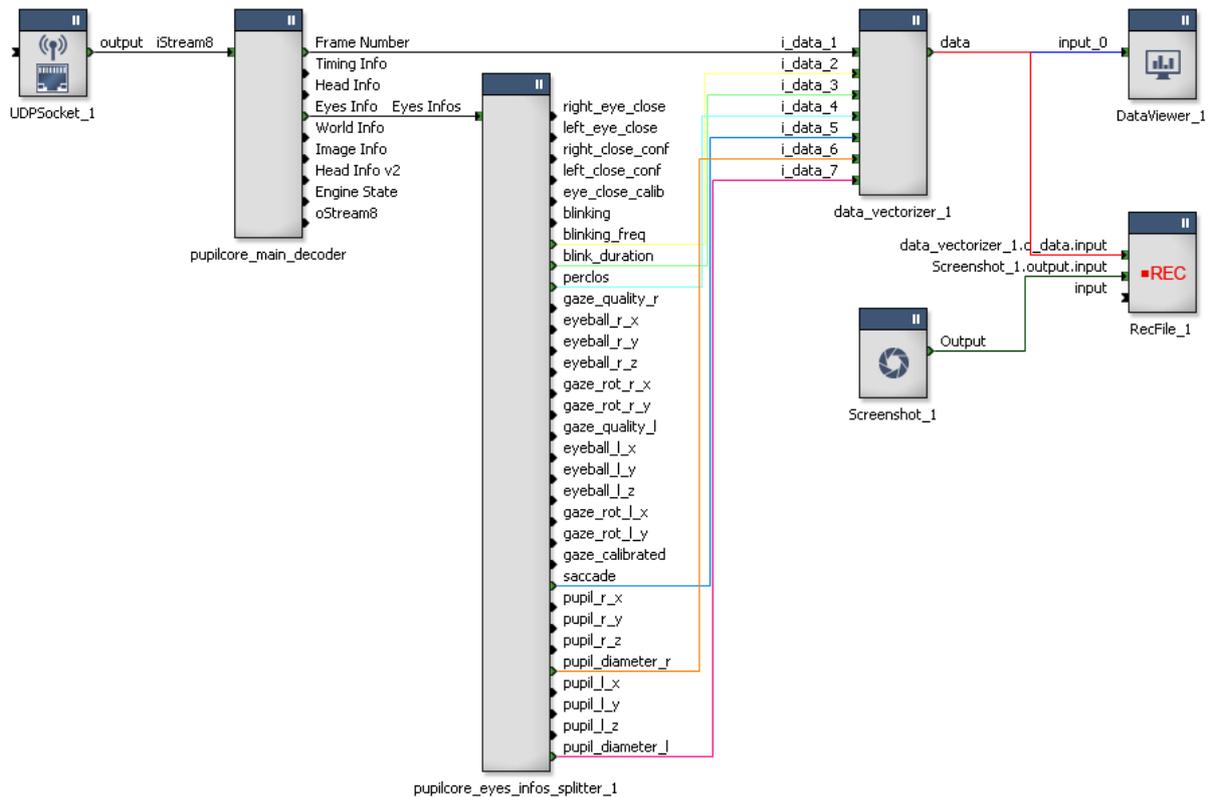


Figure 24 : Diagramme d'acquisition des données du Pupil Core sur RTMaps.

Ci-dessus est représenté le diagramme d'acquisition des données Eyetracking à travers RTMaps. Le composant UDP Socket permet de se connecter au logiciel d'acquisition Pupilcore par le biais de l'adresse IP de l'ordinateur dédié et du port réseau utilisé. La sortie de ce composant est reliée à un autre nommé « Main decoder ». La sortie Framerate, informant le numéro de chaque frame enregistrée, est relié à un composant « RecFile » pour y effectuer l'enregistrement. La sortie « Eyes\_infos » est quand a-t-elle reliée à un nouveau composant appelé « Eyes\_infos\_splitter », permettant la sélection des différentes données extraites des yeux du participant. Enfin les sorties sélectionnées de ce dernier composant, sont reliées au composant « RecFile ». Le répertoire de sortie, le format et la précision du temps, le séparateur et le format du fichier de sortie y sont communiqués pour chaque entrée. La fréquence d'acquisition des données est de 250 Hz.

## 6. Prétraitement des données

### 6.1. Isolement et uniformisation des données de reprise en main

Les fichiers de sorties des diagrammes RTMAPS représentent l'intégralité d'une session de conduite (40 minutes ou 60 minutes). Nous souhaitons uniquement étudier la période englobant chaque reprise de conduite, c'est-à-dire :

- *Avant* ; pour la prédiction de la dangerosité de la reprise à travers les différents paramètres physiologiques enregistrés.
- *Pendant* ; pour la mesure de l'état et la performance du conducteur au moment de la reprise en main du véhicule.
- *Après* ; pour mesurer l'état du conducteur et un quelconque changement d'état après une période de reprise en main.

Notre idée est d'identifier 3 périodes pour chaque reprise en main, à savoir : la période de deux minutes précédant le TOR (PRE), la période entre le TOR et la délégation de la conduite (MAIN), et la période de deux minutes suivant la délégation de la reprise (POST). Nous avons développé un programme codé en python permettant le découpage de ces périodes. Ce découpage est effectué pour chaque reprise des deux sessions de conduite, et pour chaque enregistrement de paramètres physiologiques et comportementaux.

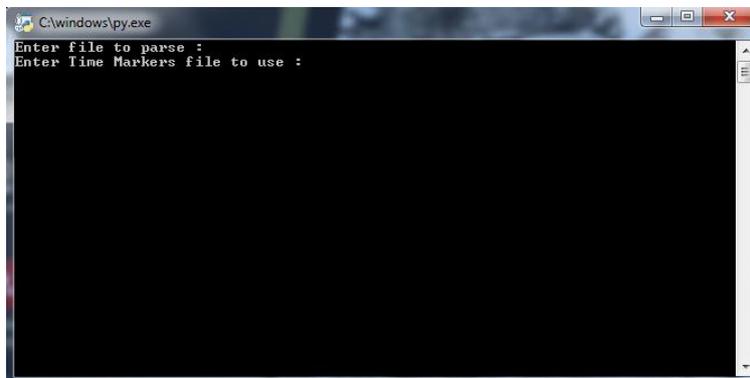


Figure 25 : Interface du programme python

Le fonctionnement du programme est simple, le fichier à découper est demandé, puis le fichier time marker, résumant la chronologie et l'horodatage des TOR, des reprises en main et des délégations de chaque reprise en main de la session de conduite du participant est demandé. Le programme crée un dossier au nom du sujet et de la session effectuée, dans lequel sont créés 6 dossiers correspondant aux 6 reprises de conduite. A l'intérieur de ces fichiers, nous retrouvons les 3 périodes : PRE, MAIN, et POST de chaque reprise de conduite.

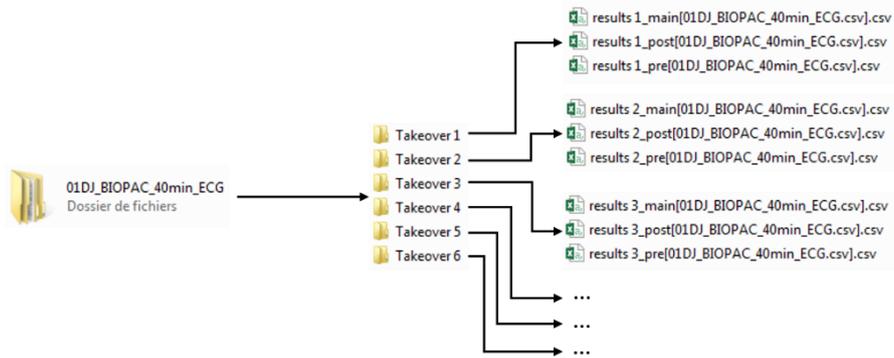


Figure 26 : Architecture de sortie de fichiers découpés

Cette méthode a pour but de faciliter la localisation de ces périodes dans les différents fichiers de sorties très lourds, qui peut s'avérer fastidieuse et prendre beaucoup de temps si cela est fait manuellement. Nos fichiers sont uniformisés et sont donc viables à une automatisation du prétraitement des données brutes et à l'extraction des variables d'intérêt. Cette automatisation permet un gain de temps considérable et permet le traitement d'un grand nombre de fichiers. Cette méthode de découpe de fichiers a été réalisée sur les fichiers bruts du CAN, de l'EEG, de l'ECG et de l'Eye-Tracking sur les deux sessions de conduite de 40 minutes et 60 minutes.

## 6.2. Activité cérébrale (EEG)

Le signal électroencéphalographique a été enregistré avec le système Liveamp de Brain Products, relié à un casque EEG Acticap à électrodes actives humides sur 14 voies du Système International 10/20 (Fz, Cz, Pz, Oz, F3, F4, P3, P4, C3, C4, O1, O2, Tp9 et Tp10) avec une référence centrée sur Fpz.

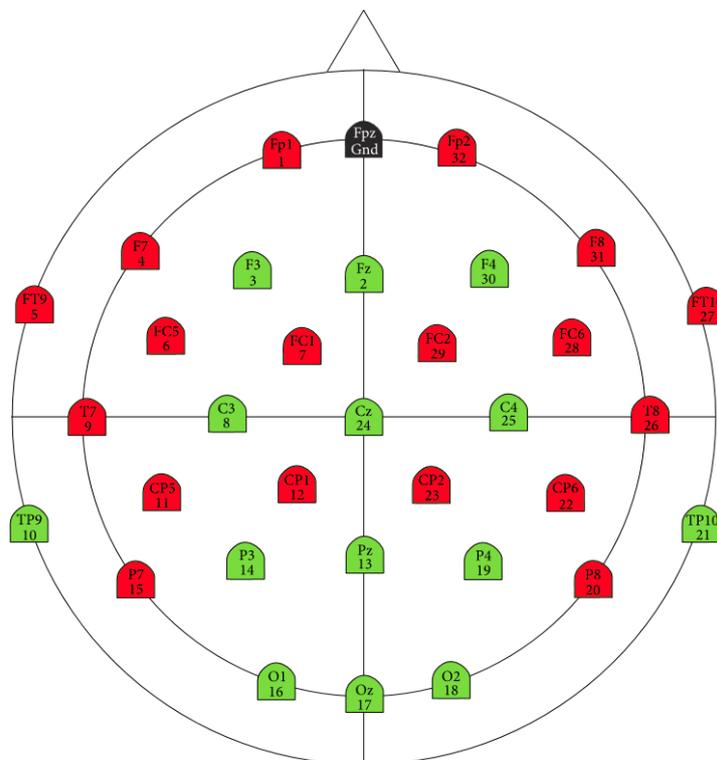
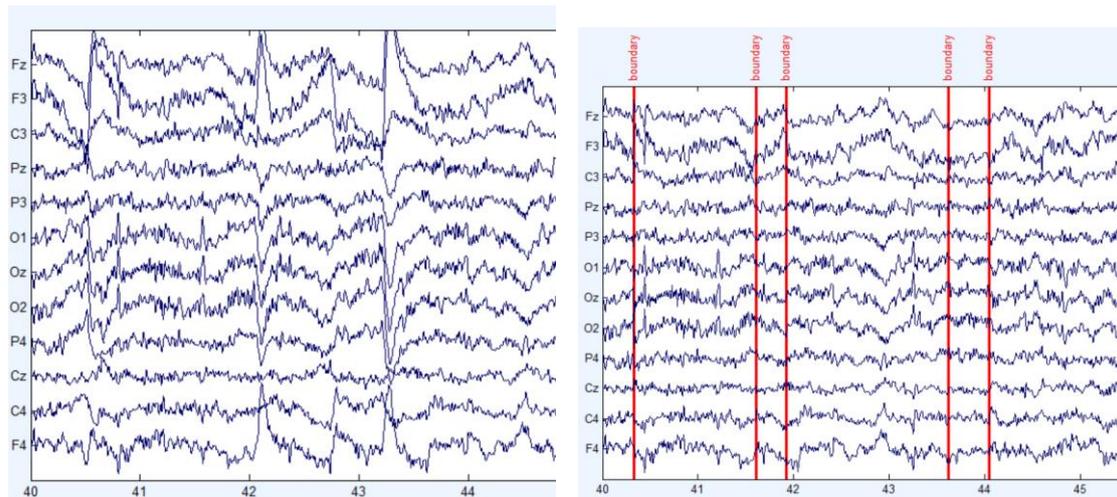


Figure 27 : Sélection (en vert) des électrodes de l'EEG : F3, Fz, F4, C3, Cz, C4, P3, Pz, P4, O1, Oz, O2, TP9, TP10

L'analyse de l'activité électroencéphalographique porte sur les deux minutes avant le TOR et pendant les 5 minutes de la Baseline. L'analyse du signal EEG a été réalisée à l'aide du logiciel EEGLAB (Delorme and Makeig, 2004) fonctionnant sous MATLAB. Le signal a d'abord été filtré avec un filtre passe-bas à 50Hz et un filtre passe-haut à 1Hz. Ensuite, le signal a été nettoyé des différents artefacts (oculaires, cardiaques, musculaires, respiratoires, thermiques, entre autres) qu'ils comportaient dans un premier temps de façon automatique grâce à la fonction 'autonomous artifact removal' de EEGLAB avec les paramètres suivants : plage fréquentielle 1-50Hz, seuil fréquentiel 11dB, époque 0.5s, nombre minimal d'époques contiguës 4 ; et dans un second temps, de façon manuelle par un expert dans le traitement du signal EEG. Par la suite, les électrodes TP10 et TP9 ont été exclues du signal, et celui-ci a été re-référencé sur un montage référentiel moyen.



**Figure 28 : Exemple de suppression des artefacts sur les signaux de l'EEG. A gauche, les signaux bruts enregistrés et à droite, ces mêmes signaux traités, avec suppression des artefacts (boundary).**

Les différents sets de données ont été organisés en structure particulière d'EEGLAB appelée 'study' pour la suite de l'analyse, cette structure permettant au logiciel de regrouper les différents sets de données d'un sujet et/ou d'une condition. En se servant de la fonction 'plot channel measure' exploitant la structure 'study' de EEGLAB, nous avons pu extraire la puissance absolue moyenne du signal, pour chaque condition et pour chaque sujet, sur différentes plages de fréquences : bande totale (1-50Hz), delta (1-4Hz), thêta (4-8Hz), alpha total (8-13Hz), alpha bas (8-10Hz), alpha haut (10-13Hz), beta total (13-30Hz), beta bas (13-17Hz), beta haut (17-30Hz) et gamma (30-50Hz), et comme suivant pour les dérivationes : pour toutes les électrodes, Fz uniquement, Cz uniquement, Pz uniquement, et Oz uniquement. Nous avons également mesuré le rapport thêta/beta sur les dérivationes frontales (Fz, F3, F4). A partir de ces valeurs de puissances absolues, nous les avons exprimées en pourcentage de la puissance absolue de la Baseline selon la formule (ici exemple pour la NDRT Radio) :

$$\%P_{absolue} = \frac{P_{absolue} \text{ alpha (NDRT Radio)}}{P_{absolue} \text{ alpha (baseline)}} * 100$$

Résumé des variables : Fz-Delta, Fz-Thêta, Fz-Alpha-Bas, Fz-Alpha-Haut, Fz-Beta-Bas, Fz-Beta-Haut, Fz-Gamma, Cz-Delta, Cz-Thêta, Cz-Alpha-Bas, Cz-Alpha-Haut, Cz-Beta-Bas, Cz-Beta-Haut, Cz-Gamma, Pz-Delta, Pz-Thêta, Pz-Alpha-Bas, Pz-Alpha-Haut, Pz-Beta-Bas, Pz-Beta-Haut, Pz-Gamma, Oz-Delta, Oz-Thêta, Oz-Alpha-Bas, Oz-Alpha-Haut, Oz-Beta-Bas, Oz-Beta-Haut, Oz-Gamma, Frontal-Thêta, Frontal-Beta, Frontal-Thêta/beta.

### 6.3. L'activité cardiaque (ECG)

La variabilité de la fréquence cardiaque des conducteurs a été enregistrée en continu tout au long de l'expérimentation grâce à un système BIOPAC MP160 relié à trois électrodes. Deux d'entre elles ont été positionnées sous les clavicules de l'opérateur, la troisième a été placée sur la partie centrale des côtes flottantes gauches. L'analyse de l'activité cardiaque porte sur les deux minutes avant le TOR et pendant les 5 minutes de la Baseline. Dans un premier temps, une procédure de prétraitement des artefacts a été réalisée et automatisée par le biais du logiciel Acqknowledge.

Nous avons développé un script d'automatisation traitant l'intégralité de tous les fichiers. Le script exécute chronologiquement des fonctions propres au logiciel Acqknowledge visant à supprimer les artefacts possiblement présents et à réduire le bruit. Dans la chronologie d'exécution, il applique un filtre passe-bande de Blackmann61 (0.5Hz-35Hz) et une détection de cycle des pulsations. Les artefacts récalcitrants sont supprimés manuellement.

Dans un second temps, le logiciel Matlab, et plus particulièrement l'interface graphique HRVTool (Vollmer, 2019), a permis d'extraire différentes variables spectrales, la moyenne de la puissance de la bande haute fréquence (0.15Hz/0.40Hz), basse fréquence (0.04Hz/0.15Hz), et la moyenne du ratio basse fréquence et haute fréquence.

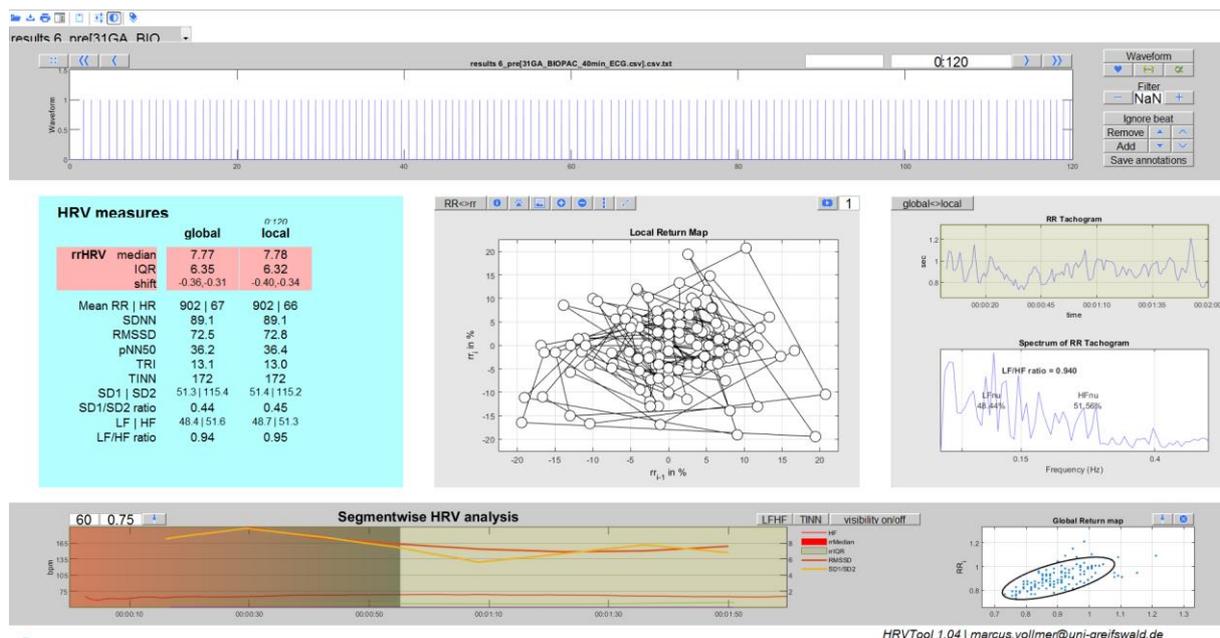


Figure 29 : Interface graphique de HRVTool, logiciel d'extraction de variables d'intérêt de la variabilité cardiaque. La partie supérieure : graphique représentant des intervalles RR avec des options d'étiquetage, de filtrage et d'affichage. La partie centrale : à gauche sont calculés les paramètres extraits de la variabilité cardiaque. Au centre, se trouve un graphique des intervalles successifs. A droite, la variabilité cardiaque est représentée à travers un tachogramme et un spectrogramme. Dans le panneau inférieur, à gauche se trouve la séquence chronologique des fréquences cardiaques et des paramètres locaux de la variabilité cardiaque. À droite, et à droite, le diagramme de Poincaré représenté par un nuage de points de tous les intervalles RR (prédécesseur vs successeur).

Le domaine d'analyse temporelle a été appréhendé par la moyenne de la fréquence cardiaque, mais également par des variables spécifiques reflétant la variabilité du rythme cardiaque, telles que la moyenne de l'intervalle RR, la médiane de ce même intervalle comparé à celui situé au temps précédent (MRRHRV), la moyenne des écarts-type des intervalles NN (SDNN), le pourcentage

d'intervalles NN dépassant 50 ms sur la plage de temps considérée (PNN50), et la moyenne quadratique des différences successives de l'intervalle NN (RMSSD).

Enfin, des mesures géométriques étant peu influencées par les valeurs extrêmes et les artefacts ont été extraites, plus précisément, l'interpolation triangulaire basée sur un histogramme de l'intervalle NN (TINN), et l'indice triangulaire calculé à partir de la largeur de la base de l'histogramme de l'intervalle NN (TRI). Face à l'imprévisibilité de la chronologie des intervalles RR, et en conséquence de la complexité des mécanismes qui régulent la variabilité du rythme cardiaque, des mesures non linéaires ont été exploitées. Le SD1 représente la variabilité à court terme, ou l'écart-type de la distance entre chaque donnée collectée par rapport au temps supérieur sur l'axe horizontal d'un diagramme de Poincaré (Golińska, 2013). Le SD2 est un indicateur de la variabilité à long terme, renseignant sur l'écart-type de la distance entre chacune des données sur l'axe vertical d'un graphique de Poincaré. Pour terminer, le ratio SD1/SD2, est un marqueur des activations sympathiques. Ces derniers marqueurs (SD1, SD2 et ratio SD1/SD2) sont associés à la chronologie RR du sujet. Pour finir, nous avons exprimé ces variables en pourcentage d'évolution par rapport à la Baseline.

Résumé des variables : MRRHRV, MeanRR, FC, SDNN, RMSSD, PNN50, TRI, TINN, SD1, SD2, SD1/SD2, HF, LF, LF/HF

### 6.3.1. Eye-Tracking (OM)

Le suivi de l'activité oculaire a été réalisé en continu par le biais d'un système d'Eye-Tracking mobile (Pupil Labs (Ehinger et al., 2019)), relié à un ordinateur muni du logiciel d'enregistrement PupilCapture, et placé sous le siège du passager. L'analyse de l'activité oculaire porte sur les deux minutes avant le TOR et pendant les 5 minutes de la Baseline. Le logiciel PupilPlayer a permis l'extraction de données oculomotrices.

A travers une macro VBA sous Excel, les fixations oculaires du conducteur ont été examinées. Plus précisément, le nombre de fixations, la fréquence de fixation par seconde, la durée moyenne de fixation en milliseconde (Fize, 2006), la moyenne des dispersions maximales des fixations, ont été calculés.

Le calcul de différentes variables reflétant les saccades oculaires a été effectué sur la base des données pupillaires récoltées. La position en x et y de la pupille est normalisée, c'est-à-dire sans unité. Afin de d'identifier les saccades du conducteur dans un environnement mesurable, les positions de la pupille ont été recalculées en fonction de la résolution de la caméra de scène. L'unité des positions est alors en pixel.

$$pos_x = video_{width} * norm_{pos_x}$$

$$pos_y = (1 - norm_{pos_y}) * video_{height}$$

L'écart-type moyen et la distance moyenne des saccades oculaires (pixel par seconde) (Jang et al., 2020), la vitesse moyenne et l'écart-type moyen de la vitesse des saccades oculaires (pixel par seconde), les variations de vitesses (Stuart et al., 2014), l'accélération et la décélération moyenne des saccades oculaires, ainsi que les écarts-types de ces trois mesures ont été calculés (pixel par seconde au carré).

$$Saccade_{distance} = \sqrt{(posx_{t1} - posx_{t2})^2 + (posy_{t1} - posy_{t2})^2}$$

$$Saccade_{vitesse} = \frac{Saccade_{distance}}{temps}$$

$$Saccade_{variation\_vitesse} = \frac{(Saccade_{vitesse1} - Saccade_{vitesse2})}{temps}$$

$$Saccade_{acceleration} = positive\ Saccade_{variation\_vitesse}$$

$$Saccade_{decceleration} = negative\ Saccade_{variation\_vitesse}$$

Enfin, un suivi de l'évolution de la pupille a été réalisé, en prenant en compte le diamètre et l'écart-type moyen de la pupille (millimètre). Pour finir, nous avons exprimé ces variables en pourcentage d'évolution par rapport à la Baseline.

Résumé des variables : Le nombre de fixations, la fréquence des fixations (/s), la durée moyenne des fixations (ms), la dispersion moyenne des fixations (pixel), le diamètre moyen de la pupille (pixel). L'écart-type du diamètre de la pupille (pixel), la distance moyenne des saccades(pixel), l'écart-type de la distance des saccades(pixel), la vitesse moyenne des saccades(pixel/s), l'écart-type de la vitesse des saccades (pixel/s), variation moyenne de la vitesse des saccades (pixel/s<sup>2</sup>), écart-type de la variation de la vitesse des saccades (pixel/s<sup>2</sup>), l'accélération moyenne des saccades (pixel/s<sup>2</sup>), la décélération moyenne des saccades (pixel/s<sup>2</sup>).

## 6.4. Validation des enregistrements

### 6.4.1. Variables de performances

Ces variables comprennent les signaux de vitesse et de force de freinage (composante longitudinale), et de la vitesse de rotation du volant et de la trajectoire du véhicule (composante latérale). Ce sont les variables de réponse. La matrice des graphiques de performance (Figure 30) montre les signaux de performance de tous les sujets par variable à partir de la demande de reprise en main ordonnée par le véhicule (TOR). Tous les signaux sont tracés en fonction de la distance parcourue par le véhicule. Ces visualisations transmettent des informations de contrôle qualité précieuses.

#### 6.4.1.1. Signaux de vitesse

Chaque graphique représente les signaux de la vitesse en kilomètre par heure (km/h). Nous pouvons visuellement constater que, en général, les évènements « TRAVAUX » et « ACCIDENT » sont ceux qui génèrent le plus de sorties de route. Les sorties de route sont identifiables par une baisse nette de la vitesse (tracés verticaux). Nous pouvons également apercevoir que les évènements « TRAVAUX » (2-60 et 6-60) sont constitués de signaux démarrant à une vitesse environnant les 90-100km/h (Figure 30). Cela représente une anomalie dans la conception. En effet, la densification du trafic routier lors de la survenue de ces évènements a provoqué des ralentissements et le véhicule du sujet a été contraint de ralentir. Toutefois, même si la vitesse a été réduite, le sujet a tout de même dû effectuer la manœuvre d'évitement. Les évènements « METEO » sont ceux où le conducteur a le plus ralenti. Cela est explicable par la visibilité faible due aux conditions climatiques dégradées (brouillard et pluie). Les conducteurs sont contraints de ralentir pour effectuer le maintien dans la voie sans danger. Dans leur globalité, chaque graphique permet d'identifier la difficulté de chaque évènement et lesquels sont les plus accidentogènes.

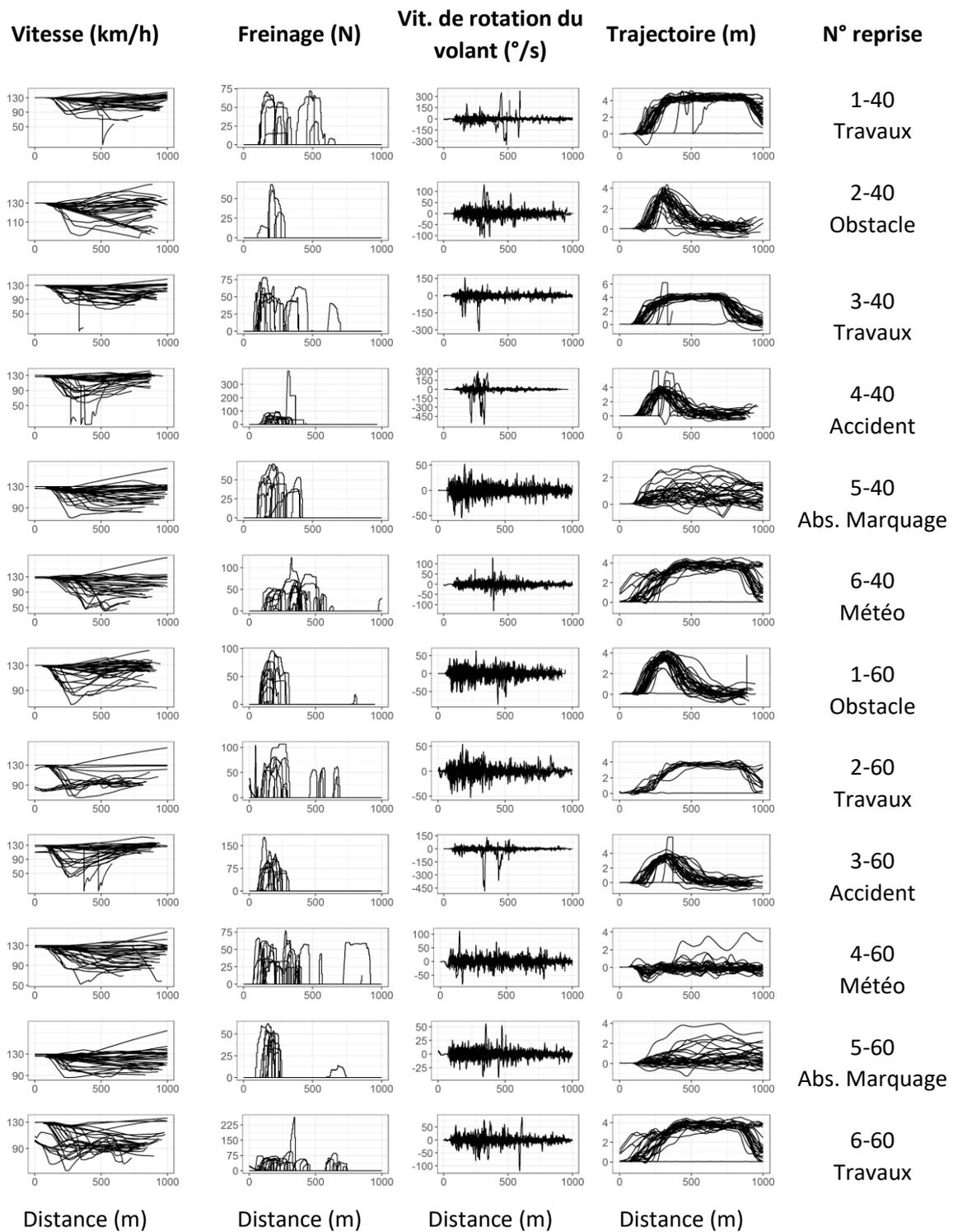


Figure 30 : Signaux de performance de tous les sujets, par variables et par reprise en main

### 6.4.1.2. Signaux de freinage

Chaque graphique représente les signaux de la force appliquée sur la pédale de frein en Newton (N) par le sujet. Nous pouvons nous rendre compte à travers les différents graphiques du niveau de sollicitation du frein nécessaire à chaque évènement. L'évènement absence de marquage au sol est celui qui génère le moins de force et d'action sur le frein. Les zones de travaux ne demandent pas non

plus une action forte de pression sur la pédale de frein car l'engagement dans les zones de travaux est guidé par le positionnement progressif des plots de signalisation. Ces derniers permettent d'accompagner le conducteur à un changement de voie non brusque. Les zones d'accident sont globalement les évènements générant la plus grosse pression sur le frein. Parmi les évènements présentés dans les scénarii, l'« ACCIDENT » est celui que l'on peut le plus associer à un danger, à un évènement grave voire mortel. Il est possible que cette perception soit la cause de cette forte sollicitation du frein. Globalement, nous pouvons voir une corrélation des signaux de freinage avec ceux de la vitesse. Lorsque les courbes de force de freinage augmentent, nous pouvons voir que les courbes de vitesses diminuent fortement.

#### **6.4.1.3. Signaux de vitesse de rotation du volant**

Chaque graphique représente les signaux de la vitesse de rotation du volant exprimée en degré par seconde ( $^{\circ}/s$ ). Ce signal est un bon indicateur de la violence des coups de volant exercés par le conducteur. En effet, plus les signaux tendent verticalement vers l'extérieur du graphique, plus le coup de volant effectué par le conducteur est violent. Nous pouvons apercevoir, par exemple, que les évènements « ACCIDENT » ont généré les plus gros coups de volant. De même pour les zones de travaux (1-40, 3-40), ce qui paraît contradictoire à la vue de la faible force de freinage exercée sur ces évènements. L'évènement « ABSENCE DE MARQUAGE AU SOL » ne demande pas une grande sollicitation du volant, ce qui est cohérent avec la manœuvre à effectuer qui est un maintien du véhicule dans la voie. L'évènement « METEO », qui nécessite un maintien dans la voie également, demande une plus grande sollicitation du volant (petits à-coups sur le volant), car la visibilité est amoindrie, et donc ajoute une difficulté supplémentaire pour maintenir le véhicule dans la voie. Ces signaux sont très intéressants car ils nous permettent d'identifier la difficulté de manœuvre et l'appréhension associée à chaque évènement.

#### **6.4.1.4. Signaux de trajectoire du véhicule**

Chaque graphique représente la position latérale du véhicule en mètre (m) sur les deux voies de circulation de la portion d'autoroute. Ces signaux sont un bon indicateur de la trajectoire empruntée par le conducteur lors de la manœuvre à effectuer pour chaque évènement. Le niveau zéro de la position verticale est la position initiale du véhicule pour toutes les reprises. Cette position est atteinte lorsque le centre vertical du véhicule est positionné au centre vertical de la voie de droite. La largeur de la voie est de 3,75m et la largeur du véhicule est de 1,85m. A partir du point zéro, les positions du véhicule tendant vers la gauche prennent des valeurs positive sur le graphique. A l'inverse, à partir du point zéro, les positions du véhicule tendant vers la droite prennent des valeurs négatives sur le graphique. Sur ce type de graphique, les changements de voie sont facilement identifiables. Lorsque les signaux atteignent 3,75m, cela veut dire que le véhicule se trouve au milieu de la voie de gauche. Le changement de voie est effectué. Le retour du signal vers la valeur zéro représente un rabattement du véhicule dans la voie de droite. Cette mesure nous permet de voir les différentes trajectoires empruntées par les conducteurs à l'approche d'un évènement. Grâce à ces graphiques, il est très facile d'identifier les types de manœuvre effectuées (changement de voie ou maintien dans la voie). Les courbes allant vers les valeurs négatives montrent une déviation de la position du véhicule vers la bande d'arrêt d'urgence. Dans certaines situations, notamment l'évènement « METEO », nous pouvons apercevoir que les courbes forment des zigzags. Cela montre une difficulté pour les sujets à maintenir le véhicule dans la voie, sûrement due par la visibilité faible. Ces graphiques corréleront avec ceux de la vitesse de rotation du volant.

### 6.4.2. Signaux liés à la l'activité cardiaque

Comme expliqué précédemment (cf. CHAPITRE 2, 3.2 ECG), les signaux des enregistrements de la variabilité cardiaque subissent un filtrage afin d'éliminer les possibles bruits ou artefacts. Afin de vérifier la qualité des signaux après cette procédure, nous utilisons deux outils graphiques : un tachogramme et le graphique de Poincaré.

Le tachogramme est une représentation graphique affichant la variabilité de la fréquence cardiaque, exprimée en durée de battement en seconde en fonction du temps. Il permet d'identifier très facilement les artefacts sur le signal. Lorsqu'un artefact est présent il est identifiable par la coupure et l'absence du signal (Figure 31 - gauche). Après application des filtres de suppression d'artefacts, si celle-ci est efficace, le signal est continu (Figure 31 - droite).

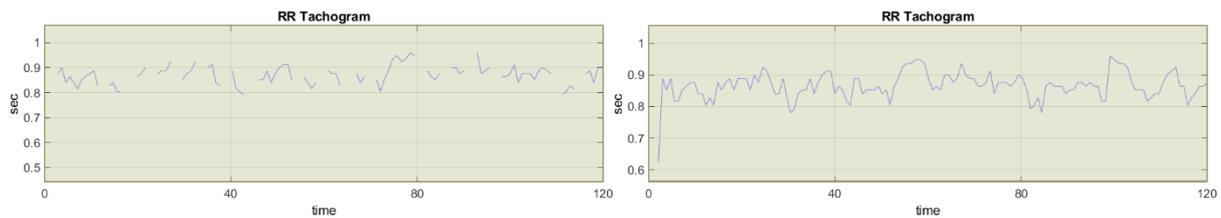


Figure 31 : A gauche, le tachogramme d'un signal ECG brut (sans filtrage). A droite, le tachogramme de ce même signal, filtré de tout artefact.

Le graphique de Poincaré représente graphiquement chaque intervalle RR associé à son intervalle précédent. Cet outil nous permet d'estimer la corrélation entre les R-R successifs. Sur ce graphique une ellipse est représentative de la mesure de dispersion des intervalles RR. Elle englobe la majorité des points du nuage et exclue les valeurs extrêmes. Ces valeurs extrêmes jugées incohérentes, et identifiées comme artefacts, sont représentées par des points orange (Figure 32 - gauche) et disparaissent après filtrage des signaux (Figure 32 - droite).

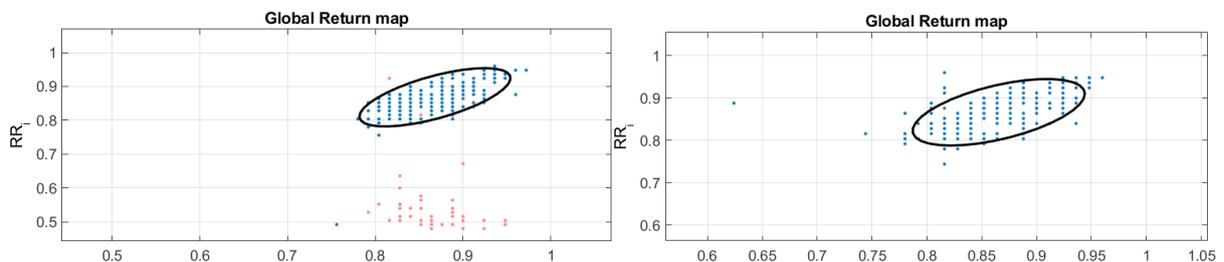


Figure 32 : Graphiques de Poincaré. A gauche avant : représentation du signal ECG brut (points orange représentant les artefacts. A droite, représentation du signal ECG filtré

Pour chaque Baseline (N = 32) et chaque reprise en main (N = 380), la qualité des enregistrements a été vérifiée à travers ces deux outils. Si après filtrage, un artefact est identifié à travers l'un des deux outils, celui-ci était éliminé manuellement.

### 6.4.3. Signaux liés à l'activité cérébrale

Comme expliqué précédemment, les signaux électroencéphalographies subissent un filtrage sur le EEGLAB et la suppression des artefacts est pratiquée manuellement par un expert dans le traitement du signal EEG. Cependant, nous avons identifié énormément de d'artefacts sur les signaux enregistrés durant la tâche non liée à la conduite « MANGER ». Ces artefacts sont directement liés à l'exécution cette tâche et leur provenance est dû à la mastication. En effet, l'activité masticatoire entraîne la contraction des muscles temporaux et celles-ci sont directement retranscrites sur les signaux (Figure

33). Ces artéfacts représentent environ 60 % du signal enregistré durant cette tâche et le rend inexploitable. Nous avons donc décidé de ne pas exploiter les signaux EEG de la tâche manger.

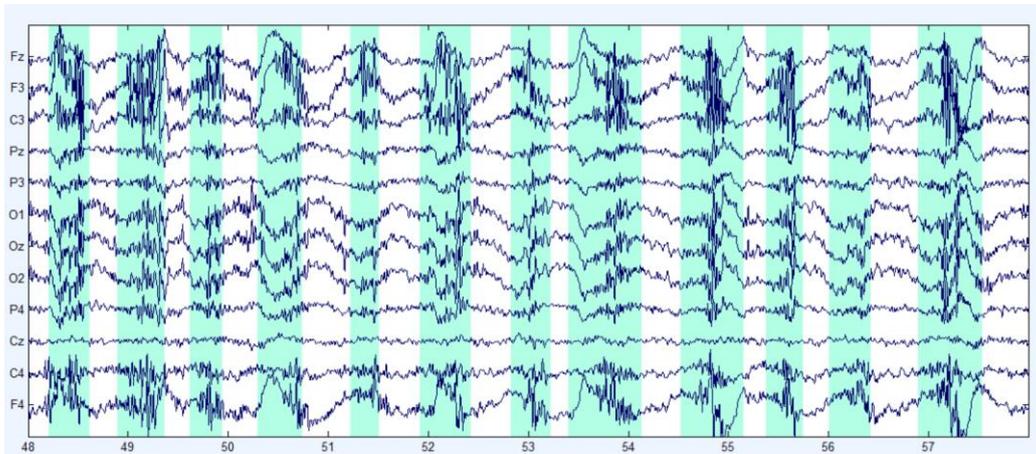


Figure 33 : Exemple de signaux EEG enregistré durant la tâche non liée à la conduite MANGER. Les zones surlignées en cyan représentent les artéfacts générés par la mastication.

#### 6.4.4. Eye-Tracking

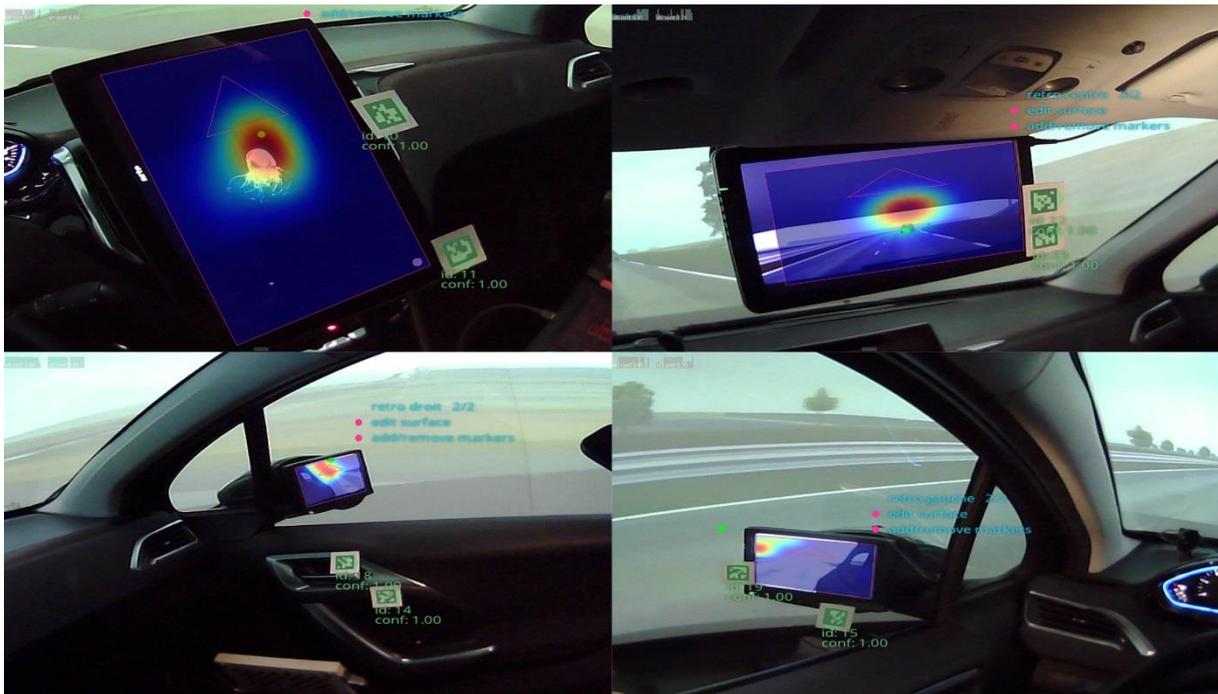


Figure 34 : Détection des marqueurs des AOIs des 3 rétroviseurs et la de tablette avec les indices de confiance de la détection.

La validation de la bonne qualité des données enregistrées par l'Eye-Tracking repose sur la précision de la détection du regard. Pour cela, nous avons vérifié si les AOIs (Area Of Interest - zones d'intérêts) étaient correctement détectées. L'indice de confiance de détection des marqueurs varie de 0 à 1. Ci-dessus sont les différentes AOIs détectées par l'un de nos sujets. L'indice de confiance est à 1 (Figure 34). Ce qui veut dire que la détection est parfaite. Assuré de la bonne détection des AOIs, nous pouvons maintenant passer à la précision du regard sur chaque AOI. Nous pouvons voir que la fixation sur chaque AOI est très précise. Plus la colorimétrie tend vers une couleur chaude (ici rouge), plus cela

correspond à la zone où regarde le sujet. A l'inverse, plus la colorimétrie tend vers une couleur froide, (ici bleu), plus la zone est éloignée de la zone fixée par le conducteur. Nous voyons pour chaque rétroviseur qu'il est très facile d'identifier la zone d'intérêt (AOI). Si une anomalie de détection du regard était présente, la zone serait plus étendue et plus approximative. En considérant ce fait, les données enregistrées sont parfaitement exploitables.

## 7. Statistiques

Cette section présente l'organisation de l'analyse statistique des données collectées dans l'étude ANTIDOTE. Elle est divisée en 3 parties.

La 1<sup>ère</sup> partie correspond à l'analyse de l'association des variables personnelles (âge, genre) du conducteur, du type de NDRT (nature, durée, implication des mains et du regard), du type d'évènement (nature et niveau de manœuvre) à gérer sur le TOT et la dangerosité de la reprise à travers les paramètres physiologiques.

La 2<sup>nde</sup> partie porte sur l'analyse de prédiction du TOT en utilisant le type de NDRT (nature, durée, implication des mains et du regard), le type d'évènement (nature et niveau de manœuvre), ainsi que les paramètres physiologiques (ECG, EEG, OM) seuls et combinés.

La 3<sup>ème</sup> partie présente l'analyse de prédiction de la dangerosité de la reprise de conduite en utilisant le type de NDRT (nature, durée, implication des mains et du regard), le type d'évènement (nature et niveau de manœuvre), ainsi que les paramètres physiologiques (ECG, EEG, OM) seuls et combinés.

### 7.1. La qualification de la reprise de conduite

#### 7.1.1. Les critères de qualifications

Afin de qualifier la reprise en main du véhicule, nous avons sélectionné plusieurs paramètres décrits ci-dessous :

- Le TTC (Time To Collision) correspond au temps mesuré en seconde qui sépare le véhicule du participant de la possible collision avec un obstacle. A vitesse constante, le TTC varie de façon constante, c'est-à-dire qu'il diminue d'une seconde toutes les secondes. Si le conducteur augmente sa vitesse, le TTC diminuera proportionnellement à l'augmentation de la vitesse. Dans le cas contraire, si le conducteur freine, le TTC augmentera proportionnellement à la diminution de la vitesse. Le TTC final est calculé lorsque le centre de l'essieu arrière du véhicule du participant franchit la ligne lors du changement de voie. Le TTC est calculé de la façon suivante (Kusano and Gabler, 2011) :

$$TTC = \frac{D}{V}$$

- D = distance séparant le véhicule de l'obstacle
- V = différence de vitesse entre le véhicule et l'obstacle.
- La collision correspond au contact du véhicule du participant avec un quelconque véhicule ou objet (rail de sécurité, plot de sécurité, etc...) présent dans la simulation et/ou lorsqu'une sortie de route est effectuée (Li et al., 2018).
- L'écart-type de la vitesse de rotation du volant (VRV), exprimé en degré par seconde (°/s), est un bon indicateur de la virulence de l'utilisation du volant. C'est-à-dire que plus le conducteur tournera le volant rapidement, plus VRV est élevé. Pour calculer le seuil de validité qui tranchera pour qualifier une reprise de bonne ou mauvaise, nous avons identifié, via le logiciel SPSS, les valeurs quartiles de notre jeu de données. Comme il n'existe pas de seuil considérant

une rotation du volant anormale (manœuvre trop brusque), nous fixons arbitrairement ce seuil aux 75<sup>e</sup> percentile de notre distribution. La valeur du 75<sup>e</sup> percentile est fixée à 10.425 °/s.

- La vérification des rétroviseurs (RETRO) correspond au regard jeté par le conducteur sur au moins l'un des rétroviseurs (extérieurs ou central) dans les 10 secondes suivant le TOR et avant toute manœuvre de changement de voie par le conducteur. C'est un bon indicateur de la vérification de la situation de conduite par le conducteur. Si le conducteur n'effectue pas la vérification, la reprise est mauvaise. Dans le cas contraire, la reprise est bonne.
- Le franchissement de ligne inapproprié (inappropriate line crossings – ILC) est identifié lorsque l'une des roues du véhicule franchit en entier la ligne de la bande d'arrêt d'urgence et/ou la ligne séparant les deux voies de circulation.

### **7.1.2. La qualification de la reprise**

La dangerosité de la reprise de conduite est qualifiée de plusieurs manières suivant la manœuvre à effectuer par le conducteur. En effet, suivant l'évènement provoquant une demande de reprise en main, le conducteur devra soit effectuer un changement de voie, ou alors maintenir le véhicule dans la voie pour sécuriser la conduite.

Dans le cadre de reprise en main nécessitant un changement de voie, la reprise de conduite est qualifiée de 3 façons différentes :

Dans le 1er cas, la dangerosité de la reprise de conduite est déterminée en fonction du TTC et de la collision. La reprise en main est bonne s'il n'y a « pas de collision » ET un « TTC »  $\geq 1.5$  secondes. Dans le cas contraire, la reprise en main est mauvaise s'il y a « collision » ET/OU un « TTC »  $< 1.5$  secondes (Li et al., 2018). Nous appelons cette qualification de la reprise en main « Q1 ».

Dans le 2ème cas, la dangerosité de la reprise de conduite est déterminée en fonction du TTC, de la collision et de VRV. La reprise en main est bonne s'il n'y a « pas de collision » ET un « TTC »  $\geq 1.5$  secondes ET « VRV »  $< 10.425$  °/s. Dans le cas contraire, la reprise en main est mauvaise s'il y a « collision » ET/OU un « TTC »  $< 1.5$  secondes ET/OU « VRV »  $\geq 10.425$ °/s. Nous appelons cette qualification de la reprise en main « Q2 ».

Dans le 3ème cas, la dangerosité de la reprise de conduite est déterminée en fonction du TTC, de la collision et de RETRO. La reprise en main est bonne s'il n'y a « pas de collision » ET un « TTC »  $\geq 1.5$  secondes ET RETRO. Dans le cas contraire, la reprise en main est mauvaise s'il y a « collision » ET/OU un « TTC »  $< 1.5$  secondes ET/OU pas de RETRO. Nous appelons cette qualification de la reprise en main « Q3 ».

Dans le cadre d'évènement ne nécessitant qu'un maintien dans la voie, la dangerosité de la reprise de conduite est qualifiée d'une seule façon. Elle est déterminée en fonction de la collision et d'ILC. La reprise en main est bonne s'il n'y a « pas de collision » ET « pas d'ILC ». Dans le cas contraire la reprise en main est mauvaise s'il y a « collision » ET/OU « ILC ». Nous appelons cette qualification de la reprise en main « Q4 ».

## **7.2. La classification des variables**

Pour tenter d'établir la prédiction de la dangerosité de la reprise, nous nous appuyerons sur les paramètres physiologiques et comportementaux enregistrés, mais également sur les données sociodémographiques du conducteur, la NDRT (nature, durée, implication des mains et sollicitation du

regard), l'évènement (nature et manœuvre). Ces variables, pour être utilisées efficacement et de façon claire, ont été classées en catégories.

Les données sociodémographiques du conducteur portent sur le genre et l'âge. Le genre est catégorisé en deux groupes, les hommes et les femmes, et l'âge est analysé en prenant en compte l'âge brut et l'âge catégorisé en trois tranches d'âge. Le 1<sup>er</sup> groupe représente les sujets jeunes, âgés entre 20 et 40 ans. Le 2<sup>nd</sup> groupe concerne les participants d'âge moyen de la tranche allant de 41 ans à 60 ans. Enfin, le 3<sup>ème</sup> groupe correspond aux sujets âgés, de la tranche allant de 61 ans à 75 ans.

Les NDRTs sont classées de plusieurs manières différentes suivant plusieurs caractéristiques. Dans un 1<sup>er</sup> temps, nous classons la NDRT par nature, c'est-à-dire par son appellation. Pour rappel, voici les différentes NDRTs retenues : MANGER, LECTURE, CONVERSATION, JEU, RADIO et VIDEO.

Les NDRTs sont classées en fonction de leur durée en trois catégories. La 1<sup>ère</sup> est composée des NDRTs dites « courtes », soit ayant une durée inférieure à 250 secondes. Le 2<sup>nd</sup>e catégorie regroupe les NDRTs dites « moyennes », c'est-à-dire ayant une durée comprise entre 250 secondes et 600 secondes. La 3<sup>ème</sup> catégorie concerne les NDRTs dites « longues », soit ayant une durée supérieure ou égale à 600 secondes.

Les NDRTs sont classées en fonction de leur degré de sollicitation du regard du participant en 3 catégories. La 1<sup>ère</sup>, appelée « Pas de sollicitation », est composée de RADIO, CONVERSATION et MANGER. Ce sont les NDRTs où, durant son exécution, le conducteur dirige son regard où bon lui semble. La 2<sup>nd</sup>e catégorie appelée « Sollicitation modérée », représente JEU et VIDEO. Ce sont les NDRTs effectuées sur la tablette, avec le regard dirigé vers la tablette. La 3<sup>ème</sup> catégorie nommée « Sollicitation forte » est composée de LECTURE, impliquant un regard du conducteur non dirigé dans le sens de la conduite.

Les NDRTs sont classées en fonction de leur degré d'implication des mains du participant en deux catégories. La 1<sup>ère</sup> appelée « Pas d'implication » est composée de RADIO, CONVERSATION, JEU et VIDEO. Ces NDRTs ne demandent pas au participant de tenir quelque chose dans ses mains durant son exécution. La 2<sup>nd</sup>e catégorie nommée « Implication » comprend LECTURE ET MANGER. Ces NDRTs demandent une implication des mains du participant pour son exécution.

Les évènements sont classés de plusieurs manières suivant plusieurs caractéristiques. Dans un 1<sup>er</sup> temps, nous classons les évènements par nature, c'est-à-dire par son appellation. Pour rappel, voici les différents évènements présents dans les scénarii de conduite : TRAVAUX, OBSTACLE, ACCIDENT, ABS. MARQUAGE et METEO.

Les évènements sont classés en deux catégories, en fonction de la manœuvre à effectuer pour les gérer. La 1<sup>ère</sup> catégorie appelée « Changement de voie » est constituée de « TRAVAUX », « OBSTACLE » et « ACCIDENT ». Ils impliquent un changement de voie à effectuer par le conducteur pour sécuriser la conduite. La 2<sup>nd</sup>e catégorie nommée « maintien dans la voie », concerne « ABS. MARQUAGE » et « METEO ». Ces évènements nécessitent un maintien du véhicule dans la voie par le conducteur.

### **7.3. Analyses de prédiction du temps de réponse (TOT)**

Des analyses univariées ont permis d'identifier les variables permettant de prédire le TOT. Les analyses univariées font appel à plusieurs tests. Un test de corrélation de Pearson est réalisé pour étudier le lien entre les variables continues (âge, durée de NDRT, paramètres EEG, ECG et OM) et le TOT. Un test de Student pour échantillons indépendants (T-test) compare le TOT en fonction du genre et l'implication des mains de NDRT. Une ANOVA à un facteur, suivie d'un test post-hoc de Bonferroni, est

réalisée pour comparer le TOT en fonction des catégories d'âge, nature de l'évènement, nature de NDRT et durée, sollicitation du regard catégorisée de la NDRT.

Enfin, une régression linéaire multiple pas-à-pas ascendante (une Modélisation linéaire automatique (ALM pour Automatic Linear Model)), dont le critère d'entrée utilisé est Hurvich and Tsai's Criterion (AICC), est effectuée pour déterminer les variables prédictives du TOT. Les variables introduites dans le modèle multivarié doivent présenter un  $p < 0.15$ . Le genre, l'âge sont automatiquement introduits pour ajuster le modèle.

Toutes ces analyses sont réalisées, d'un côté pour les reprises avec changement de voie et d'un autre pour les reprises avec un maintien dans la voie. Nous tentons également de prédire le TOT en utilisant les données brutes des paramètres physiologiques et comportementaux d'un côté, et les données de ces mêmes paramètres calculées en pourcentage d'évolution par rapports aux données de la Baseline de l'autre, afin d'en normaliser les valeurs et donc de limiter les différences interindividuelles.

## 7.4. Prédiction de la dangerosité de la reprise

Concernant la prédiction de la dangerosité de la reprise, les analyses univariées font appel à plusieurs tests :

- Un test de Student pour échantillons indépendants (T-test) compare les variables continues (Âge, durée de NDRT, paramètres EEG, ECG et OM) avec les qualifications (Q1, Q2, Q3 et Q4) de la dangerosité de la reprise (bonne/mauvaise).
- Un test de Khi-deux ( $\chi^2$ ) est effectué pour étudier la liaison entre le Temps de réponse (TOT quantitatif) et le genre, les catégories d'âge, nature de l'évènement, nature de NDRT et durée, sollicitation du regard, implication des mains catégorisée de la NDRT.

Puis, une régression logistique pas-à-pas ascendante (méthode de vraisemblance pour estimer les coefficients) est mise en œuvre pour définir les paramètres qui pourront prédire la dangerosité de la reprise. Les variables introduites dans les modèles de régression doivent présenter un  $p < 0.15$ .

Toutes ces analyses sont réalisées en utilisant les données brutes des paramètres physiologiques et comportementaux d'un côté, et les données de ces mêmes paramètres calculées en pourcentage d'évolution par rapports aux données de la Baseline de l'autre.

## 7.5. Critères et méthode d'interprétation des résultats

Le seuil de significativité est fixé à  $p < 0.05$  pour tous les tests statistiques et le seuil de tendance pour inclure les variables dans les modèles multivariés est fixé à  $p < 0.15$ .

Dans le cadre de l'analyse du Temps de réponse (TOT) et de la dangerosité de la reprise de conduite, le sens de significativité pour chaque variable est représenté par le symbole « ↗ » pour une corrélation positive et le « ↘ » pour une corrélation négative.

L'ALM est un modèle automatique permettant de combiner des prédicteurs (ici nos variables explicatives) de telle sorte que la valeur cible (ici le TOT) est prédite à son niveau optimal. Les prédicteurs reçoivent automatiquement un niveau d'importance et sont combinés pour expliquer la variance de la variable cible. Le résultat est un pourcentage faisant référence au niveau de la variance du TOT expliquée. Plus le pourcentage est élevé, plus le modèle est prédictif.

Concernant les modèles de prédiction de la dangerosité de la reprise, un modèle de classification binaire sous forme de matrice est utilisé. Quatre résultats sont possibles : vrai positif (TP), faux positif (FP), vrai négatif (TN) et faux négatif (FN). TP est le nombre de reprises de conduite qualifiées de bonnes et prédites comme bonnes, FP est le nombre de reprises de conduite qualifiées de mauvaises mais prédites comme bonnes, FN est le nombre de reprises de conduite qualifiées de bonnes mais prédites comme mauvaises et TN est le nombre de reprises de conduite qualifiées de mauvaises et prédites comme mauvaises.

Par la suite, nous avons utilisé trois indicateurs d'évaluation de la classification, la sensibilité (Se), la spécificité (Sp) et l'indice de Youden, pour évaluer les performances du modèle (Delacour et al., 2005), qui ont été définis comme suit:

$$Se = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$Sp = \frac{TN}{TN + FP}$$

$$Youden = Se + Sp - 1$$

La sensibilité (Se) mesure la proportion de reprises prédites comme étant bonnes parmi les reprises effectivement bonnes. La spécificité (Sp) mesure la proportion de reprises prédites comme étant mauvaises parmi les reprises effectivement mauvaises. L'indice de Youden, associant la sensibilité et la spécificité permet de connaître l'efficacité de prédiction du modèle. Plus son score est proche de 1, plus le modèle de prédiction est parfait.

La courbe ROC est également utilisée pour visualiser la relation existante entre la sensibilité et la spécificité des modèles de prédiction. Cette relation est calculée pour toutes les valeurs seuils possibles. Elle permet de déterminer la validité et la performance de tests diagnostiques évaluant des aires sous la courbe. (Delacour et al., 2005). L'inverse de la spécificité (1-Sp) se place en abscisse alors que la sensibilité se trouve en ordonnée de ce graphique.

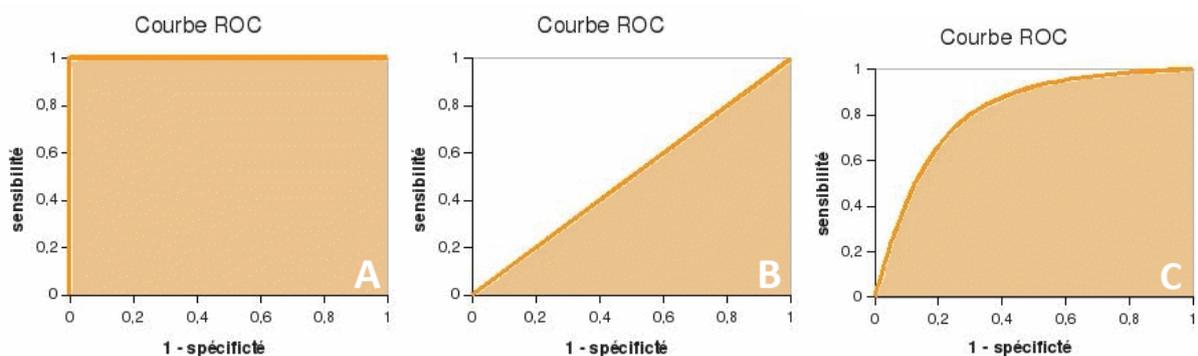


Figure 35 : Interprétation de la courbe ROC

Si la discrimination entre reprise de conduite non-dangereuse et ratée est parfaite, la courbe ROC se présente de cette façon et la surface sous la courbe (AUC) vaut 1 (Figure 35-A).

A l'inverse, lorsque le test n'est pas discriminant, la probabilité de distinguer une reprise de conduite ratée d'une reprise de conduite non-dangereuse est de 50%. On dit alors que la probabilité s'apparente au hasard. Dans ce cas, la surface sous la courbe ROC est égale à 0.5 (Figure 35-B).

Entre ces deux extrêmes, tous les cas de figure sont possibles. La surface sous la courbe dépend de l'allure générale de la courbe, et donc de la sensibilité et de la spécificité du test (Figure 35-C).

## 7.6. Exclusion des données biaisées

Toutes les reprises en main ayant nécessité un TOT supérieur à 7 secondes sont éliminées des analyses. Ces reprises font référence à une mauvaise utilisation du bouton de commande de désactivation de la conduite automatisée par le participant. Au total, 22 reprises de conduite sont concernées par cette exclusion.

Certaines reprises en main nécessitant initialement un changement de voie se sont transformées en reprises sans changement de voie. En effet, en amont du TOR, le dépassement d'un véhicule environnant a été initié par le système autonome. Au TOR, le changement de voie normalement exécuté par l'utilisateur était déjà acté. Un total de 23 reprises concernées par cette anomalie, ont été exclues.

Dans le cadre d'analyses impliquant l'utilisation des variables de la ECG, l'ensemble des signaux d'un sujet était illisible malgré la procédure de prétraitement. De plus, des problèmes de connexion entre le boîtier d'acquisition et la base du système BIOPAC pendant l'enregistrement ont mené à des pertes de données. Au total, en prenant en compte le retrait des reprises avec un TOT supérieur à 7 secondes et les reprises en main défectueuses, les données de 322 reprises de conduite et 31 Baselines ont été analysées. Les données d'une Baseline et 62 reprises de conduite ont été exclues.

Dans le cadre d'analyses impliquant l'utilisation des variables de l'EEG, toute reprise impliquant MANGER est exclue. Les signaux enregistrés durant l'exécution de cette tâche étaient énormément bruités par la mastication et étaient inexploitable (Chapitre 2:6.4.3). De plus, des soucis de connexion liés à la connexion Bluetooth pendant l'enregistrement ont mené à des pertes de données. Au total, en prenant en compte le retrait des reprises avec un TOT >7 et les reprises défectueuses, les données de 259 reprises de conduite et 32 Baselines ont été analysées. 117 reprises de conduite ont été exclues.

Dans le cadre d'analyses impliquant l'utilisation des variables de OM, les données de 15 sujets ont été enregistrées. Le faible nombre de sujets impliqués est dû à la réception du système Pupil Core en cours d'étude. Au total, en prenant en compte le retrait des reprises avec un TOT >7 et les reprises défectueuses, les données de 149 reprises de conduite et 15 Baselines ont été analysées. 31 reprises de conduite ont été exclues.

## **CHAPITRE 3: RESULTATS**



# 1. Association des variables avec le TOT

Pour identifier l'association des variables avec le TOT, nous n'avons pas pris en compte les reprises de conduites avec anomalie et celles ayant amené un temps de réponse supérieur à 7 secondes. Au total, un panel de 339 reprises de conduite est retenu et le TOT moyen des participants sur ces reprises est de  $2.558 \pm 0.796$  secondes.

## 1.1. L'âge et le genre

Dans cette section, nous voulons identifier si des variables sociodémographiques telles que l'âge et le genre du conducteur, sont associés ou non avec le temps de réponse (TOT). Nous constatons que l'âge ( $r = -0.47$ ,  $p = 0.385$ ) ne modifie pas la valeur du TOT. Il en est de même lorsqu'il est classé par catégorie ( $p = 0.189$ ). Quant au genre, il est tendanciellement associé avec le TOT (T-Test,  $p = 0.092$ ) (Tableau 2).

P	Variable	Catégorie	Moyenne	Ecart-type	N
0.39	Âge	/	2.558	0.796	339
0.19	Âge catégorisé	20-40	2.630	0.879	171
		41-60	2.440	0.577	83
		61-75	2.531	0.799	85
0.09	Genre	Homme	2.630	0.897	172
		Femme	2.484	0.671	167

Tableau 1 : TOTs moyens  $\pm$  écart types en fonction de l'âge (numérique et catégorisé) et du genre.

## 1.2. Variables relatives à la NDRT et l'évènement

Ici, nous identifions l'association des variables avec les tâches non liées à la conduite (NDRT) et aux évènements provoquant une demande de reprise en main.

Nous constatons que la nature de la NDRT modifie la durée du TOT (ANOVA,  $p = 0.000$ ) (Tableau 2). En effet, le TOT pendant la NDRT « LECTURE » est significativement plus long que celui pendant la NDRT « RADIO » (Bonferroni,  $p = 0.000$ ) et que celui pendant la NDRT « VIDEO » (Bonferroni,  $p = 0.019$ ). Le TOT pendant la NDRT « LECTURE » est également tendanciellement plus long que celui pendant la NDRT « CONVERSATION » (Bonferroni,  $p = 0.08$ ).

Concernant les NDRTs demandant une implication des mains (« MANGER », « LECTURE »), une association au TOT est observée. Effectivement, le TOT est en moyenne significativement plus long lorsque le conducteur tient un objet dans les mains (T-Test,  $p = 0.000$ ) (Tableau 2).

Pour la sollicitation du regard, la NDRT avec une forte sollicitation (Lecture) présente un TOT plus long que les NDRTs avec une sollicitation faible (Bonferroni,  $p = 0.03$ ) ou modérée (Bonferroni,  $p = 0.04$ ) (Tableau 2) du regard. En revanche, nous n'avons pas observé de différences entre celles impliquant une sollicitation du regard faible et modérée.

Nous constatons que la durée de la NDRT ( $p = 0.47$ ) n'est pas associée avec le TOT (Tableau 2). Il en est de même lorsqu'elle est classée par catégorie ( $p = 0.77$ ).

Nous observons que la nature de l'évènement n'est pas associée avec le TOT (Tableau 2). Cela signifie que aucune différence n'est à déclarer sur le temps de réponse moyen entre les différents évènements.

<i>P</i>	<i>Variable</i>	<i>Catégorie</i>	<i>Moyenne TOT (s)</i>	<i>Ecart-type TOT</i>	<i>N</i>
0.000	Nature de la NDRT	Manger	2.790	0.845	59
		Lecture	2.887	0.781	60
		Conversation	2.476	0.791	53
		Jeu	2.538	0.830	55
		Radio	2.262	0.631	56
		Vidéo	2.420	0.749	56
0.47	Durée (NDRT - seconde)	/	2.558	0.796	339
0.76	Durée catégorisée (NDRT - seconde)	<250	2.597	0.865	136
		> = 250 ; <600	2.528	0.757	116
		> = 600	2.540	0.741	87
0.002	Sollicitation du regard (NDRT)	Pas de sollicitation	2.494	0.782	168
		Sollicitation	2.478	0.788	111
		Sollicitation forte	2.887	0.781	60
0.000	Implication des mains (NDRT)	Pas d'implication	2.423	0.755	220
		Implication	2.809	0.814	119
0.72	Nature de l'évènement	Travaux	2.590	0.922	105
		Obstacle	2.435	0.683	59
		Accident	2.560	0.850	56
		Abs. Marquage	2.629	0.780	63
		Météo	2.547	0.603	56
0.59	Type d'évènement	Changement de voie	2.590	0.701	220
		Maintien dans la voie	2.541	0.844	119

**Tableau 2 : TOTs moyens  $\pm$  écart types en fonction des tâches distractives (nature, durées catégorisées, sollicitation du regard, implication des mains) des évènements (nature et type de manœuvre : changement de voie ou maintien dans la voie)**

### 1.3. Variables relatives à l'activité cardiaque (ECG)

Ici nous tentons de voir quelles variables de l'activité cardiaque sont associées au temps de réponse (TOT) dans l'optique de les sélectionner pour prédire ce dernier. Nous mesurerons l'impact de ces variables sur le TOT de deux façons différentes. La première est d'utiliser les données brutes, c'est-à-dire uniquement les données enregistrées pendant la conduite simulée. La 2<sup>ème</sup> façon est de comparer ces mêmes données brutes, avec les données enregistrées pendant la Baseline, correspondant à l'état au repos du conducteur. Les données brutes comparées à celles de la Baseline résultent à des valeurs en pourcentage d'évolution. Nous observons également l'association des variables sur le type de manœuvre à effectuer, c'est-à-dire d'un côté pour les reprises nécessitant un changement de voie, et d'un autre pour les reprises nécessitant un maintien dans la voie. Les résultats sont répertoriés dans un tableau (Tableau 3).

Lors des reprises de conduite nécessitant un changement de voie et utilisant les données brutes enregistrées, nous observons que SDNN ( $p = 0.014$ ,  $\nearrow$ ), SD2 ( $p = 0.007$ ,  $\nearrow$ ), LF ( $p = 0.014$ ,  $\searrow$ ) sont significativement associées avec le TOT. Une tendance est observée pour les variables RMSSD ( $p = 0.1$ ,  $\nearrow$ ), et SD1 ( $p = 0.1$ ,  $\nearrow$ ), SD1/SD2 ( $p = 0.1$ ,  $\searrow$ ), LF/HF ( $p = 0.12$ ,  $\nearrow$ ).

Pour les données brutes comparées à la Baseline, nous remarquons que MRRHRV ( $p = 0.01$ ,  $\nearrow$ ), SDNN ( $p = 0.001$ ,  $\nearrow$ ), RMSSD ( $p = 0.015$ ,  $\nearrow$ ), TRI ( $p = 0.046$ ,  $\nearrow$ ), SD1 ( $p = 0.015$ ,  $\nearrow$ ), SD2 ( $p = 0.000$ ,  $\nearrow$ ), LF ( $p = 0.022$ ,  $\searrow$ ) sont significativement associées au TOT. Une tendance est observée pour les variables PNN50 ( $p = 0.06$ ,  $\nearrow$ ) et LF/HF ( $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ).

Lors des reprises de conduite nécessitant un maintien dans la voie et en prenant en compte les données brutes nous remarquons qu'aucune variable n'est associée au TOT.

Pour les données brutes comparées à la Baseline, nous observons que MRRHRV ( $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ), RMSSD ( $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ), SD1 ( $p = 0.12$ ,  $\nearrow$ ), et HF ( $p = 0.12$ ,  $\searrow$ ) sont tendanciellement associées sur le TOT.

	<i>P</i>			
	Données Brutes		Données en % Évolution / Baseline	
	Maintien voie N = 112	Changement voie N = 210	Maintien voie N = 112	Changement voie N = 210
<i>MRRHRV</i>	0.57	0.58	0.13	0.01
<i>MeanRR</i>	0.27	0.29	0.36	0.33
<i>FC</i>	0.29	0.26	0.5	0.36
<i>SDNN</i>	0.78	0.014	0.22	0.001
<i>RMSSD</i>	0.78	0.11	0.13	0.016
<i>PNN50</i>	0.71	0.51	0.97	0.051
<i>TRI</i>	0.94	0.008	0.46	0.001
<i>TINN</i>	0.97	0.14	0.8	0.2
<i>SD1</i>	0.77	0.11	0.12	0.016
<i>SD2</i>	0.87	0.007	0.31	0.000
<i>SD1/SD2</i>	0.69	0.07	0.86	0.31
<i>HF</i>	0.52	0.78	0.12	0.74
<i>LF</i>	0.55	0.011	0.16	0.02
<i>LF/HF</i>	0.74	0.1	0.25	0.13

**Tableau 3 : Association des variables de l'activité cardiaque au TOT, pour les reprises avec et sans changement de voie en fonction des données brutes et comparées à la Baseline.**

Pour rappel, voici le glossaire des variables du Tableau 3 :

**MRRHRV** : Médiane de la Variabilité de la fréquence cardiaque basée sur les intervalles RR relatifs

**MeanRR** : Moyenne des intervalles RR

**FC** : Fréquence Cardiaque

**SDNN** : Standard Deviation of NN intervals (Ecart-type des intervalles NN)

**RMSSD** : Moyenne quadratique des différences successives de la fréquence cardiaque (Root Mean Square of Successive Differences)

**PNN50** : Pourcentage de différences > 50 ms entre les intervalles NN successifs

**TRI** : Index Triangulaire de l'histogramme des l'intervalles NN

**TINN** : Interpolation Triangulaire d'histogramme dès l'intervalles NN

**SD1** : Ecart-type de la variabilité à court terme de l'intervalle RR (diagramme de Poincaré)

**SD2** : Ecart type de la variabilité à long terme de l'intervalle RR (diagramme de Poincaré)

**SD1/SD2** : Ratio court terme/long terme de la fréquence cardiaque

**HF** : Haute fréquence des battements du cœur (0.15 à 0.4 Hz – High Frequency)

**LF** : Basse fréquence des battements du cœur (0.04 à 0.15 Hz – Low Frequency)

**LF/HF** : Ratio basse fréquence/haute fréquence des battements du cœur

## 1.4. Variables relatives à l'activité cérébrale (EEG)

Ici nous identifions quelles variables de l'EEG modifient le temps de réponse (TOT) dans l'optique de prédire ce dernier. Nous mesurons l'impact de ces variables sur le TOT de deux façons. La 1<sup>ère</sup> est d'utiliser les données brutes, donc les données enregistrées pendant la conduite simulée. La 2<sup>ème</sup> façon est de comparer ces mêmes données brutes, avec celles enregistrée durant la Baseline (état au repos du conducteur). Les données brutes comparées à la Baseline résultent à des valeurs en pourcentage d'évolution.

	<i>P</i>			
	Données Brutes		Données en % Évolution	
	Maintien N = 99	Changement N = 170	Maintien N = 99	Changement N = 170
<i>Fz-Delta</i>	0.15	0.57	0.18	0.007
<i>Fz-Thêta</i>	0.27	0.64	0.11	0.008
<i>Fz-Alpha-Bas</i>	0.28	0.84	0.28	0.07
<i>Fz-Alpha-Haut</i>	0.39	0.96	0.22	0.1
<i>Fz-Beta-Bas</i>	0.46	0.59	0.08	0.019
<i>Fz-Beta-Haut</i>	0.52	0.61	0.15	0.067
<i>Fz-Gamma</i>	0.35	0.4	0.034	0.016
<i>Cz-Delta</i>	0.09	0.43	0.32	0.08
<i>Cz-Thêta</i>	0.28	0.79	0.11	0.043
<i>Cz-Alpha-Bas</i>	0.24	0.94	0.33	0.34
<i>Cz-Alpha-Haut</i>	0.25	0.85	0.38	0.61
<i>Cz-Beta-Bas</i>	0.42	0.59	0.19	0.14
<i>Cz-Beta-Haut</i>	0.66	0.69	0.13	0.21
<i>Cz-Gamma</i>	0.25	0.47	0.1	0.037
<i>Pz-Delta</i>	0.45	0.07	0.45	0.46
<i>Pz-Thêta</i>	0.14	0.049	0.93	0.25
<i>Pz-Alpha-Bas</i>	0.12	0.08	0.84	0.08
<i>Pz-Alpha-Haut</i>	0.14	0.18	0.92	0.12
<i>Pz-Beta-Bas</i>	0.46	0.07	0.74	0.24
<i>Pz-Beta-Haut</i>	0.15	0.023	0.68	0.032
<i>Pz-Gamma</i>	0.12	0.92	0.68	0.1
<i>Oz-Delta</i>	0.036	0.43	0.66	0.93
<i>Oz-Thêta</i>	0.16	0.79	0.97	0.79
<i>Oz-Alpha-Bas</i>	0.11	0.91	0.77	0.96
<i>Oz-Alpha-Haut</i>	0.11	1	0.83	0.99
<i>Oz-Beta-Bas</i>	0.13	0.9	0.85	0.8
<i>Oz-Beta-Haut</i>	0.17	0.89	0.79	0.66
<i>Oz-Gamma</i>	0.14	0.74	0.97	0.22
<i>Frontal-Thêta</i>	0.31	0.35	0.13	0.2
<i>Frontal-Beta</i>	0.39	0.33	0.18	0.3
<i>Frontal-Thêta/Beta</i>	0.76	0.57	0.72	0.48

Tableau 4 : Association des variables de l'activité cérébrale au TOT, pour les reprises en main avec et sans changement de voie en fonction des signaux absolus et comparées à la Baseline.

De plus, nous observons l'association des variables avec le type de manœuvre à effectuer, c'est-à-dire d'un côté pour les reprises nécessitant un changement de voie, et nécessitant un maintien dans la voie de l'autre. Les résultats sont répertoriés dans un tableau (Tableau 4). Pour rappel, les différentes variables présentes dans le Tableau 4 correspondent à la mesure des différentes plages de fréquences de l'activité cérébrale : bande totale (1-50Hz), delta (1-4Hz), thêta (4-8Hz), alpha total (8-13Hz), alpha bas (8-10Hz), alpha haut (10-13Hz), beta total (13-30Hz), beta bas (13-17Hz), beta haut (17-30Hz) et gamma (30-50Hz). Ces plages de fréquences sont mesurées à des points précis sur la boîte crânienne, déterminés par la position des électrodes suivantes : Fz, Cz, Pz, et Oz. Nous la bande Thêta, la Bande Beta et le rapport thêta/beta sont mesurés sur les dérivations frontales (Fz, F3, F4). Le positionnement des différentes électrodes citées ci-dessus est présent sur la Figure 27.

Lors des reprises de conduite nécessitant un changement de voie et utilisant les données brutes enregistrées, nous observons que Pz-Thêta ( $p = 0.047$ ,  $\searrow$ ), Pz-Beta-Haut ( $p = 0.022$ ,  $\searrow$ ), sont significativement associées au TOT. Une tendance est observée pour les variables Pz-Delta ( $p = 0.07$ ,  $\searrow$ ), Pz-Alpha-Bas ( $p = 0.08$ ,  $\searrow$ ), Pz-Beta-Bas ( $p = 0.07$ ,  $\searrow$ ).

Pour les données brutes comparées à la Baseline. Nous remarquons que Fz-Delta ( $p = 0.006$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Thêta ( $p = 0.008$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Beta-Bas ( $p = 0.02$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Gamma ( $p = 0.019$ ,  $\nearrow$ ), Cz-Thêta ( $p = 0.043$ ,  $\nearrow$ ), Cz-Gamma ( $p = 0.045$ ,  $\nearrow$ ), Pz-Beta-Haut ( $p = 0.026$ ,  $\nearrow$ ) sont significativement associées au TOT. Une tendance est observée pour les variables Fz-Alpha-Bas ( $p = 0.070$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Alpha-Haut ( $p = 0.11$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Beta-Haut ( $p = 0.08$ ,  $\nearrow$ ), Cz-Delta ( $p = 0.08$ ,  $\nearrow$ ), Pz-Alpha-Bas ( $p = 0.07$ ,  $\searrow$ ), Pz-Alpha-Haut ( $p = 0.11$ ,  $\searrow$ ), Pz-Gamma ( $p = 0.09$ ,  $\searrow$ ).

Lors des reprises de conduite nécessitant un maintien dans la voie et en prenant en compte les données brutes nous remarquons que Oz-Delta ( $p = 0.036$ ,  $\searrow$ ) et Pz-Gamma ( $p = 0.05$ ,  $\searrow$ ) sont significativement associées au TOT. Une tendance est observée pour les variables Fz-Delta ( $p = 0.15$ ,  $\searrow$ ), Cz-Delta ( $p = 0.09$ ,  $\searrow$ ), Pz-Thêta ( $p = 0.14$ ,  $\searrow$ ), Pz-Alpha-Bas ( $p = 0.12$ ,  $\searrow$ ), Pz-Alpha-Haut ( $p = 0.14$ ,  $\searrow$ ), Pz-Beta-Haut ( $p = 0.15$ ,  $\searrow$ ), , Oz-Alpha-Bas ( $p = 0.15$ ,  $\searrow$ ), Oz-Alpha-Haut ( $p = 0.11$ ,  $\searrow$ ), Oz-Beta-Bas ( $p = 0.13$ ,  $\searrow$ ), Oz-Gamma ( $p = 0.14$ ,  $\searrow$ ).

Pour les données brutes comparées à la Baseline, nous observons que Fz-Gamma ( $p = 0.019$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Thêta ( $p = 0.008$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Beta-Bas ( $p = 0.02$ ,  $\nearrow$ ), Cz-Thêta ( $p = 0.043$ ,  $\nearrow$ ) et Cz-Gamma ( $p = 0.045$ ,  $\nearrow$ ) sont significativement associées au TOT. Fz-Beta-Haut ( $p = 0.08$ ,  $\nearrow$ ), est tendanciellement associée avec le TOT.

## 1.5. Variables relatives à l'activité oculomotrice (Eye-Tracking - OM)

Dans ce point, nous observons quelles variables de l'Eye-Tracking sont associées au temps de réponse (TOT) dans l'optique de les sélectionner pour prédire ce dernier. Nous mesurerons l'impact de ces variables sur le TOT de deux façons différentes. La première est d'utiliser les données brutes, c'est-à-dire uniquement les données enregistrées pendant la conduite simulée. La 2<sup>ème</sup> façon est de comparer ces mêmes données brutes, avec les données enregistrées pendant la Baseline, correspondant à l'état au repos du conducteur. Les données brutes comparées à celles de la Baseline résultent à des valeurs en pourcentage d'évolution. Nous observons également l'association des variables sur le type de manœuvre à effectuer, c'est-à-dire d'un côté pour les reprises nécessitant un changement de voie, et d'un autre pour les reprises nécessitant un maintien dans la voie. Les résultats sont répertoriés dans un tableau (Tableau 5).

Lors des reprises de conduite nécessitant un changement de voie et utilisant les données brutes enregistrées, nous observons que le diamètre moyen de la pupille ( $p = 0.000$ ,  $\nearrow$ ), et la distance moyenne des saccades ( $p = 0.008$ ,  $\searrow$ ) sont significativement associées au TOT. Une tendance est observée pour l'écart-type de la distance des saccades ( $p = 0.09$ ,  $\searrow$ ), l'écart-type de la vitesse des saccades ( $p = 0.14$ ,  $\searrow$ ), l'écart-type de la variation de la vitesse des saccades ( $p = 0.1$ ,  $\searrow$ ).

Pour les données brutes comparées à la Baseline, nous remarquons que la durée moyenne des fixations ( $p = 0.035$ ,  $\searrow$ ), et la dispersion moyenne des fixations ( $p = 0.000$ ,  $\nearrow$ ) sont significativement associées au TOT.

	P			
	Données Brutes		Données en %Évolution	
	Maintien N = 50	Changement N = 99	Maintien N = 50	Changement N = 99
<i>Nombre de fixations</i>	0.04	0.45	0.22	0.35
<i>Fréquence des fixations</i>	0.039	0.44	0.19	0.65
<i>Durée moyenne des fixations</i>	0.99	0.46	0.44	0.035
<i>Dispersion moyenne des fixations</i>	0.48	0.77	0.005	0.000
<i>Diamètre moyen de la pupille</i>	0.002	0.000	0.52	0.2
<i>Écart-type du diamètre de la pupille</i>	0.85	0.88	0.37	0.38
<i>Distance moyenne des saccades</i>	0.11	0.008	0.28	0.54
<i>Écart-type de la distance des saccades</i>	0.1	0.09	0.24	0.63
<i>Vitesse moyenne des saccades</i>	0.63	0.54	0.38	0.49
<i>Écart-type de la vitesse des saccades</i>	0.47	0.14	0.26	0.25
<i>Variation moyenne de la vitesse des saccades</i>	0.76	0.71	0.4	0.45
<i>Écart-type de la variation de la vitesse des saccades</i>	0.52	0.09	0.26	0.26
<i>Accélération moyenne des saccades</i>	0.61	0.47	0.37	0.52
<i>Décélération moyenne des saccades</i>	0.72	0.73	0.37	0.41

Tableau 5 : Association des variables de l'oculométrie au TOT.

Lors des reprises de conduite nécessitant un maintien dans la voie et en prenant en compte les données brutes nous remarquons que le nombre de fixations ( $p = 0.04$ ,  $\nearrow$ ), la fréquence des fixations ( $p = 0.039$ ,  $\nearrow$ ) et le diamètre moyen de la pupille ( $p = 0.002$ ,  $\nearrow$ ) sont significativement associées au TOT. Une tendance est observée pour la distance moyenne des saccades ( $p = 0.11$ ,  $\searrow$ ) et l'écart-type de la distance des saccades ( $p = 0.1$ ,  $\searrow$ ).

Pour les données brutes comparées à la Baseline, nous observons que la durée moyenne des fixations ( $p = 0.035$ ,  $\searrow$ ) et la dispersion moyenne des fixations ( $p = 0.000$ ,  $\nearrow$ ) sont significativement associées au TOT.

## 2. Association des variables sur la dangerosité de la reprise de conduite

### 2.1. A travers la qualification 1 de la reprise

Dans cette section, nous montrons quelles variables (âge et genre du conducteur, de la NDRT (nature, durée, implication des mains, sollicitation du regard), de l'évènements (nature et type de manœuvre), de l'ECG, EEG et OM) sont associées à la dangerosité de la reprise de conduite à travers la qualification 1 (Q1). Pour rappel, Q1 est déterminée en fonction du TTC et de la collision et ne prend en compte que les reprises en main nécessitant un changement de voie.

#### 2.1.1. Age, genre, tâches non liées à la conduite et évènements

Le TOT est significativement associé à la dangerosité de la reprise en Q1 (T-Test,  $p = 0.000$ ). Les résultats montrent que le TOT moyen pour les reprises de conduite qualifiées comme « non-dangereuses » est égal à  $2.360 \pm 0.611s$ . Le TOT moyen pour les reprises qualifiées comme « dangereuses » est égal à  $3.023 \pm 1.148s$  (Tableau 6). Les participants n'ayant pas réussi leur reprise de conduite (reprise dangereuse) ont un temps de réaction 28.3% plus long que ceux qui ont réussi leur reprise de conduite (reprise non dangereuse) (Tableau 7).

Variable	Qualification de la reprise	N	Moyenne	Ecart-type	Erreur standard moyenne	P
TOT (s)	Dangereuse	60	3.023	1.148	0.148	0.000
	Non-dangereuse	160	2.360	0.611	0.0483	
Âge	Dangereuse	60	42.510	17.164	2.216	0.61
	Non-dangereuse	160	43.843	16.997	1.344	
Durée NDRT (s)	Dangereuse	60	277.30	144.684	18.679	0.000
	Non-dangereuse	160	385.71	275.456	21.777	

Tableau 6 : Qualification 1 - TOT, âge et durée de la NDRT en fonction de la dangerosité de la reprise (Moyenne  $\pm$  écart type).

Ni l'âge (T-Test,  $p = 0.61$ ), numérique ou catégorisé (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.93$ ), ni le genre (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.18$ ), ne sont associés à la dangerosité de la reprise. La nature de la NDRT n'est pas associée à la dangerosité de la reprise (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.75$ ). En revanche, la durée de la NDRT est significativement associée à la dangerosité de la reprise (T-test,  $p = 0.000$ ). Pour les reprises de conduite « réussi », le temps moyen des NDRT effectuées était de  $385.71 \pm 275s$  et pour les reprises « raté », le temps moyen est de  $277.3 \pm 144s$  (Tableau 6). C'est surtout lorsque la durée de la NDRT est comprise entre 250 et 600 secondes qu'il y a le plus de reprises dangereuses (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.000$ ) (Tableau 7). Ni la sollicitation du regard de la NDRT (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.59$ ), ni l'implication des mains de la NDRT (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.71$ ), ne sont associées à la dangerosité de la reprise. L'évènement est significativement associé à la dangerosité de la reprise (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.000$ ). Le taux de reprises de conduite considérées comme dangereuses, induit par l'évènement « TRAVAUX » est de 39%. Celui d' « OBSTACLE » est de 25%, et pour « ACCIDENT », il est de 7% (Tableau 7).

En ce qui concerne les critères pris en compte pour estimer la dangerosité de la reprise, le TTC ne dépend pas de l'âge numérique (Pearson,  $p = 0.2$ ) ou catégorisé (ANOVA,  $p = 0.24$ ), ni de la nature de la NDRT (ANOVA,  $p = 0.21$ ). La présence de collision ne dépend ni de l'âge numérique (T-test,  $p = 0.97$ ) ou catégorisé (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.84$ ), ni de la NDRT (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.19$ ).

Variable	P	Catégorie	N	Dangereuse	Non dangereuse	% dangerosité
Age catégorisé	0.92	20-40	113	31	82	27%
		41-60	52	15	37	29%
		61-75	55	14	41	25%
Genre	0.18	Homme	112	35	77	31%
		Femme	108	25	83	23%
Nature de l'évènement	0.000	Travaux	105	41	64	39%
		Obstacle	59	15	44	25%
		Accident	56	4	52	7%
Nature de la NDRT	0.75	Manger	36	8	28	22%
		Lecture	38	11	27	29%
		Conversation	31	10	21	32%
		Jeu	39	12	27	31%
		Radio	37	7	30	19%
		Vidéo	39	12	27	31%
Durée de la NDRT (seconde)	0.000	<250	109	29	80	27%
		>=250 ; <600	55	27	28	49%
		>=600	56	4	52	7%
Implication des mains NDRT	0.71	Non	146	41	105	28%
		Oui	74	19	55	26%
Sollicitation du regard NDRT	0.58	Aucune	104	25	79	24%
		Modérée	78	24	54	31%
		Forte	38	11	27	29%

Tableau 7 : Qualification 1 - Pourcentage de reprises dangereuses en fonction de l'âge catégorisé, du genre, des NDRT (nature, durée catégorisée, sollicitation du regard, implication des mains) et de la nature de l'évènement.

### 2.1.2. Activité cardiaque (ECG)

N = 210	P	
	Brut	% Évolution
MRRHRV	0.26	0.22
MeanRR	0.47	0.85
FC	0.52	0.83
SDNN	0.45	0.41
RMSSD	0.14	0.34
PNN50	0.3	0.52
TRI	0.61	0.73
TINN	0.64	0.69
SD1	0.14	0.34
SD2	0.37	0.47
SD1/SD2	0.37	0.8
HF	0.88	0.9
LF	0.17	0.71
LF/HF	0.14	0.57

Tableau 8 : Association des variables extraites de l'activité cardiaque à Q1.

En prenant en compte les données brutes de l'ECG, nous observons un impact tendanciel de RMSSD (T-test,  $p = 0.14$ ,  $\searrow$ ), SD1 (T-test,  $p = 0.14$ ,  $\searrow$ ) et LF/HF (T-test,  $p = 0.14$ ,  $\nearrow$ ) sur la dangerosité de la reprise de conduite à travers Q1.

En revanche, aucune variable n'a d'impact sur la dangerosité de la reprise par Q1.

### 2.1.3. Activité cérébrale (EEG)

Aucun signal brut de l'EEG n'est associé à la dangerosité de la reprise à travers les critères de qualification 1.

Le résultat en est de même lorsque ces mêmes données brutes sont comparées à la Baseline (%Évolution).

N = 170	P		N = 170	P	
	Données Brutes	Données en %Évolution		Données Brutes	Données en %Évolution
<i>Fz-Delta</i>	0.39	0.29	<i>Pz-Delta</i>	0.95	0.98
<i>Fz-Thêta</i>	0.54	0.28	<i>Pz-Thêta</i>	0.85	1
<i>Fz-Alpha-Bas</i>	0.6	0.41	<i>Pz-Alpha-Bas</i>	0.65	0.89
<i>Fz-Alpha-Haut</i>	0.6	0.5	<i>Pz-Alpha-Haut</i>	0.85	0.88
<i>Fz-Beta-Bas</i>	0.62	0.41	<i>Pz-Beta-Bas</i>	1	0.99
<i>Fz-Beta-Haut</i>	0.67	0.37	<i>Pz-Beta-Haut</i>	0.91	0.95
<i>Fz-Gamma</i>	0.85	0.35	<i>Pz-Gamma</i>	0.81	0.93
<i>Cz-Delta</i>	0.62	0.44	<i>Oz-Delta</i>	0.65	0.61
<i>Cz-Thêta</i>	0.53	0.23	<i>Oz-Thêta</i>	0.56	0.4
<i>Cz-Alpha-Bas</i>	0.64	0.31	<i>Oz-Alpha-Bas</i>	0.7	0.44
<i>Cz-Alpha-Haut</i>	0.53	0.38	<i>Oz-Alpha-</i>	0.6	0.42
<i>Cz-Beta-Bas</i>	0.55	0.28	<i>Oz-Beta-Bas</i>	0.58	0.4
<i>Cz-Beta-Haut</i>	0.7	0.34	<i>Oz-Beta-Haut</i>	0.49	0.32
<i>Cz-Gamma</i>	0.78	0.39	<i>Oz-Gamma</i>	0.55	0.34
<i>Frontal-Thêta</i>	0.68	0.48	<i>Frontal thêta/beta</i>	0.5	0.69
<i>Frontal-Beta</i>	0.9	0.6			

Tableau 9 : Association des variables de l'activité cérébrale à Q1.

### 2.1.4. Activité oculomotrice (Eye-Tracking - OM)

En prenant en compte les données brutes de l'Eye-Tracking, aucune variable n'est associée à qualification 1.

En outre, quelques variables des données brutes de l'Eye-Tracking comparées à la Baseline comme la durée moyenne des fixations (T-test,  $p = 0.08$ ,  $\nearrow$ ), et la dispersion moyenne des fixations (T-test,  $p = 0.09$ ,  $\searrow$ ), sont tendanciellement associées à la qualification 1.

N = 99	P	
	Données Brutes	Données en %Évolution
<i>Nombre de fixations</i>	0.73	0.84
<i>Fréquence des fixations</i>	0.71	0.75
<i>Durée moyenne des fixations</i>	0.32	0.08
<i>Dispersion moyenne des fixations</i>	0.77	0.09
<i>Diamètre moyen de la pupille</i>	0.28	0.77
<i>Écart-type du diamètre de la pupille</i>	0.36	0.53
<i>Distance moyenne des saccades</i>	0.33	0.21
<i>Écart-type de la distance des saccades</i>	0.61	0.65
<i>Vitesse moyenne des saccades</i>	0.5	0.73
<i>Écart-type de la vitesse des saccades</i>	0.73	0.7
<i>Variation moyenne de la vitesse des saccades</i>	0.39	0.71
<i>Écart-type de la variation de la vitesse des saccades</i>	0.9	0.82
<i>Accélération moyenne des saccades</i>	0.5	0.7
<i>Décélération moyenne des saccades</i>	0.42	0.73

Tableau 10 : Association des variables de l'oculométrie à Q1.

## 2.2. A travers la qualification 2 de la reprise

Dans cette section, nous montrons quelles variables (âge et genre du conducteur, de la NDRT (nature, durée, implication des mains, sollicitation du regard), de l'évènements (nature et type de manœuvre), de l'ECG, EEG, OM) sont associées à la dangerosité de la reprise de conduite à travers la qualification 2 (Q2). Pour rappel, Q2 est déterminée en fonction du TTC, de la collision et de l'écart-type de la vitesse de rotation du volant (VRV) et ne prend en compte que les reprises en main nécessitant un changement de voie.

### 2.2.1. Age, genre, NDRT et évènements

Le TOT est significativement plus court lorsque la reprise est considérée comme non-dangereuse que lorsque la reprise est considérée comme dangereuse (T-Test,  $p = 0.001$ ). Les participants n'ayant pas réussi leur reprise de conduite (reprise dangereuse) ont un temps de réaction 16.1% plus long que ceux qui ont réussi leur reprise de conduite (reprise non dangereuse) (Tableau 11). Le genre n'est pas associé à la dangerosité de la reprise en Q2 (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.5$ ). Au contraire, l'âge numérique, est significativement associé (T-Test,  $p = 0.008$ ), et de même pour l'âge catégorisé (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.019$ ). La moyenne d'âge des sujets ayant été dangereux sur leur reprise de conduite est de  $46.49 \pm 17.76$  ans, contre  $40.41 \pm 15.71$  ans pour ceux qui ne l'ont pas été (Tableau 11). Les sujets dont l'âge est compris entre 61-75 ans sont plus dangereux (64 % de reprises dangereuses) que les sujets dont l'âge est compris entre 20 et 40 ans (42% de reprises dangereuses) (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.019$ ) (Tableau 12). La nature de la NDRT n'est pas associée à la dangerosité de la reprise (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.93$ ). Cependant, la durée de la NDRT est significativement associée à la dangerosité de la reprise (T-test,  $p = 0.019$ ). Pour les reprises de conduite « non-dangereuse », le temps moyen des NDRT effectuées était de  $396.22 \pm 277.29$ s et pour les NDRT « raté », le temps moyen est de  $316.79 \pm 216.61$ s (Tableau 11).

Ni l'implication des mains de la NDRT (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.92$ ), ni la sollicitation du regard de la NDRT (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.8$ ) ne sont associées à la dangerosité de la reprise. L'évènement est significativement associé à la

dangérosité de la reprise ( $K\chi^2$ ,  $p = 0.004$ ). Le taux des reprises de conduite considérées comme dangereuses, induit par l'évènement « TRAVAUX » est de 62%. Celui d' « OBSTACLE » est de 42%, et pour « ACCIDENT », il est de 38% (Tableau 12).

La vitesse de rotation du volant dépend de l'âge (Pearson,  $p = 0.007$ ). En regardant par catégorie d'âge (ANOVA,  $p = 0.041$ ), nous observons la vitesse de rotation du volant est significativement plus élevée chez les sujets de 61-75 ans que les sujets 20-40 ( $p = 0.046$ ). En revanche, elle ne dépend pas de la nature de la NDRT (ANOVA,  $p = 0.91$ ).

Variable	Qualification de la reprise	N	Moyenne	Écart-type	Erreur standard moyenne	P
TOT (s)	Dangereuse	111	2.729	1.014	0.096	0.001
	Non-dangereuse	109	2.349	0.570	0.0546	
Âge	Dangereuse	111	46.490	17.761	1.686	0.008
	Non-dangereuse	109	40.413	15.712	1.473	
Durée de la NDRT (s)	Dangereuse	111	316.79	216.607	20.559	0.019
	Non-dangereuse	109	396.22	277.292	26.560	

Tableau 11 : TOT, âge et durée de la NDRT en fonction de la dangérosité de la reprise (Moyenne  $\pm$  écart type)

Variable	P	Catégorie	N	Dangereuse	Non dangereuse	% Dangérosité
Age catégorisé	0.019	20-40	113	47	66	42%
		41-60	52	29	23	56%
		61-75	55	35	20	64%
Genre	0.5	Homme	112	54	58	48%
		Femme	108	57	51	53%
Nature de l'évènement	0.004	Travaux	105	65	40	62%
		Obstacle	59	25	34	42%
		Accident	56	21	35	38%
Nature de la NDRT	0.93	Manger	36	16	20	44%
		Lecture	38	21	17	55%
		Conversation	31	16	15	52%
		Jeu	39	20	19	51%
		Radio	37	20	17	54%
		Vidéo	39	18	21	46%
Durée de la NDRT (seconde)	0.07	<250	109	58	51	53%
		>=250 ; <600	55	32	23	58%
		>=600	56	21	35	38%
Implication des mains NDRT	0.92	Non	146	74	72	51%
		Oui	74	37	37	50%
Sollicitation du regard NDRT	0.8	Aucune	104	52	52	50%
		Modérée	78	38	40	49%
		Forte	38	21	17	55%

Tableau 12 : Pourcentage de reprises dangereuses en fonction de l'âge catégorisé, du genre, des NDRT (nature, durée catégorisée, sollicitation du regard, implication des mains) de la nature de l'évènement.

## 2.2.2. Activité cardiaque (ECG)

En prenant en compte les données brutes de l'ECG, nous constatons que les variables PNN50 (T-test,  $p = 0.039$ , ↗) et SD1/SD2 (T-test,  $p = 0.038$ , ↗) sont significativement associées à la dangerosité de la reprise de conduite à travers Q2. Une tendance est observée pour les variables MRRHRV (T-test,  $p = 0.06$ , ↗), MeanRR (T-test,  $p = 0.13$ , ↗), et FC (T-test,  $p = 0.1$ , ↘) (Tableau 13).

En prenant en compte les données brutes de l'ECG, comparées à la Baseline (% Évolution), nous constatons que MeanRR (T-test,  $p = 0.001$ , ↗), FC (T-test,  $p = 0.000$ , ↘) et SD1/SD2 (T-test,  $p = 0.002$ , ↗) sont significativement associées. Une tendance est observée pour LF/HF (T-test,  $p = 0.06$ , ↘) (Tableau 13).

N = 210	P	
	Données Brutes	Données en %Évolution
MRRHRV	0.056	0.35
MeanRR	0.13	0.001
FC	0.1	0.000
SDNN	0.33	0.86
RMSSD	0.42	0.91
PNN50	0.039	0.76
TRI	0.49	0.62
TINN	0.25	0.83
SD1	0.42	0.91
SD2	0.27	0.77
SD1/SD2	0.038	0.002
HF	0.4	0.87
LF	0.78	0.23
LF/HF	0.48	0.048

Tableau 13 : Association des variables extraites de l'activité cardiaque à Q2.

## 2.2.3. Activité cérébrale (EEG)

En prenant en compte les données brutes de l'EEG, nous constatons que Fz-Delta (T-test,  $p = 0.024$ , ↘), Fz-Beta-Haut (T-test,  $p = 0.05$ , ↘) Cz-Delta (T-test,  $p = 0.032$ , ↘), Cz-Alpha-Haut (T-test,  $p = 0.05$ , ↘), Cz-Beta-Bas (T-test,  $p = 0.032$ , ↘), Cz-Beta-Haut (T-test,  $p = 0.03$ , ↘), Cz-Gamma (T-test,  $p = 0.025$ , ↘), Frontal-Thêta (T-test,  $p = 0.008$ , ↘), Frontal-beta (T-test,  $p = 0.018$ , ↘) sont significativement associées à la dangerosité de la reprise de conduite à travers Q2. Une tendance est observée pour Fz-Thêta (T-test,  $p = 0.06$ , ↘), Fz-Alpha-Bas (T-test,  $p = 0.06$ , ↘), Fz-Alpha-Haut (T-test,  $p = 0.07$ , ↘), Fz-Beta-Bas (T-test,  $p = 0.06$ , ↘), Fz-Gamma (T-test,  $p = 0.09$ , ↘), Cz-Thêta (T-test,  $p = 0.13$ , ↘), Cz-Alpha-Bas (T-test,  $p = 0.07$ , ↘), Oz-Delta (T-test,  $p = 0.09$ , ↘) (Tableau 14).

Concernant les données brutes de l'EEG comparés à la Baseline (% Évolution), nous constatons que Fz-Delta (T-test,  $p = 0.05$ , ↗), Fz-Alpha-Bas (T-test,  $p = 0.05$ , ↘), et Frontal-Thêta (T-test,  $p = 0.021$ , ↘) sont significativement associées à la dangerosité de la reprise de conduite en Q2. Une tendance est observée pour Fz-Thêta (T-test,  $p = 0.07$ , ↘), Fz-Alpha-Haut (T-test,  $p = 0.14$ , ↘), Fz-Beta-Bas (T-test,  $p = 0.15$ , ↘), Fz-Beta-Haut (T-test,  $p = 0.14$ , ↘), Fz-Gamma (T-test,  $p = 0.12$ , ↘), Cz-Delta (T-test,  $p = 0.12$ , ↘), Cz-Alpha-Bas (T-test,  $p = 0.08$ , ↘), Cz-Alpha-Haut (T-test,  $p = 0.12$ , ↘), Cz-Beta-Bas (T-test,  $p = 0.14$ , ↘), Cz-Beta-Haut (T-test,  $p = 0.11$ , ↘), Cz-Gamma (T-test,  $p = 0.7$ , ↘) et Frontal-Beta (T-test,  $p = 0.06$ , ↘) (Tableau 14).

N = 170	P		N = 170	P	
	Données Brutes	Données en %Évolution		Données Brutes	Données en %Évolution
<i>Fz-Delta</i>	0.024	0.05	<i>Pz-Delta</i>	0.2	0.67
<i>Fz-Thêta</i>	0.063	0.07	<i>Pz-Thêta</i>	0.44	1
<i>Fz-Alpha-Bas</i>	0.064	0.053	<i>Pz-Alpha-Bas</i>	0.64	0.94
<i>Fz-Alpha-</i>	0.065	0.14	<i>Pz-Alpha-</i>	0.22	0.7
<i>Fz-Beta-Bas</i>	0.061	0.15	<i>Pz-Beta-Bas</i>	0.27	0.98
<i>Fz-Beta-Haut</i>	0.053	0.14	<i>Pz-Beta-Haut</i>	0.22	1
<i>Fz-Gamma</i>	0.09	0.11	<i>Pz-Gamma</i>	0.24	0.73
<i>Cz-Delta</i>	0.032	0.12	<i>Oz-Delta</i>	0.09	0.21
<i>Cz-Thêta</i>	0.13	0.21	<i>Oz-Thêta</i>	0.26	0.43
<i>Cz-Alpha-Bas</i>	0.069	0.08	<i>Oz-Alpha-Bas</i>	0.35	0.43
<i>Cz-Alpha-</i>	0.051	0.12	<i>Oz-Alpha-</i>	0.27	0.42
<i>Cz-Beta-Bas</i>	0.032	0.14	<i>Oz-Beta-Bas</i>	0.22	0.52
<i>Cz-Beta-Haut</i>	0.03	0.11	<i>Oz-Beta-Haut</i>	0.17	0.42
<i>Cz-Gamma</i>	0.025	0.069	<i>Oz-Gamma</i>	0.16	0.35
<i>Frontal-Thêta</i>	0.008	0.021	<i>Frontal thêta/beta</i>	0.9	0.29
<i>Frontal-Beta</i>	0.018	0.057			

Tableau 14 : Association des variables de l'activité cérébrale à Q2.

#### 2.2.4. Activité oculomotrice (Eye-Tracking - OM)

En prenant en compte les données brutes de l'OM, la durée moyenne des fixations (T-test,  $p = 0.039$ ,  $\nearrow$ ) et le diamètre moyen de la pupille (T-test,  $p = 0.05$ ,  $\nearrow$ ) sont significativement associées à la qualification 2.

N = 99	P	
	Données Brutes	Données en %Évolution
<i>Nombre de fixations</i>	0.28	0.23
<i>Fréquence des fixations</i>	0.34	0.16
<i>Durée moyenne des fixations</i>	0.039	0.14
<i>Dispersion moyenne des fixations</i>	0.78	0.55
<i>Diamètre moyen de la pupille</i>	0.052	0.86
<i>Écart-type du diamètre de la pupille</i>	0.57	0.07
<i>Distance moyenne des saccades</i>	0.45	0.57
<i>Écart-type de la distance des saccades</i>	0.14	0.065
<i>Vitesse moyenne des saccades</i>	0.11	0.91
<i>Écart-type de la vitesse des saccades</i>	0.13	0.22
<i>Variation moyenne de la vitesse des saccades</i>	0.11	0.96
<i>Écart-type de la variation de la vitesse des saccades</i>	0.08	0.26
<i>Accélération moyenne des saccades</i>	0.13	0.87
<i>Décélération moyenne des saccades</i>	0.1	0.91

Tableau 15 : Association des variables de l'oculométrie à Q2.

Une tendance est identifiée pour l'écart type de la distance des saccades (T-test,  $p = 0.14$ ,  $\searrow$ ), la vitesse moyenne des saccades (T-test,  $p = 0.11$ ,  $\searrow$ ), l'écart-type de la vitesse des saccades (T-test,  $p = 0.13$ ,  $\searrow$ ), la moyenne de la variation de la vitesse des saccades (T-test,  $p = 0.11$ ,  $\nearrow$ ), l'écart-type de la variation

de la vitesse des saccades (T-test,  $p = 0.08$ ,  $\searrow$ ), l'accélération moyenne des saccades (T-test,  $p = 0.13$ ,  $\searrow$ ) et la décélération moyenne des saccades (T-test,  $p = 0.1$ ,  $\nearrow$ ).

En prenant en compte les données brutes de l'OM comparées à la Baseline, une tendance est observée sur la qualification 2 pour la durée moyenne des fixations (T-test,  $p = 0.14$ ,  $\nearrow$ ), l'écart-type du diamètre de la pupille (T-test,  $p = 0.07$ ,  $\searrow$ ) et l'écart type de la distance des saccades (T-test,  $p = 0.07$ ,  $\searrow$ ).

## 2.3. A travers la qualification 3 de la reprise

Dans cette section, nous montrons quelles variables (âge et genre du conducteur, de la NDRT (nature, durée, implication des mains, sollicitation du regard), de l'évènements (nature et type de manœuvre), de l'ECG, EEG, OM) sont associées à la dangerosité de la reprise de conduite à travers la qualification 3 (Q3). Pour rappel, Q3 est déterminée en fonction du TTC, de la collision et la vérification des rétroviseur (RETRO) et ne prend en compte que les reprises en main nécessitant un changement de voie.

### 2.3.1. Age, genre, NDRT et évènements

Le TOT est significativement associé à la dangerosité de la reprise à travers Q3 (T-Test,  $p = 0.000$ ). Les résultats montrent que le TOT moyen pour les reprises de conduite qualifiées comme « non-dangereuse » est égal à  $2.348 \pm 0.589s$ . Le TOT moyen pour les reprises qualifiées comme « dangereuses » est égal à  $2.825 \pm 1.061s$ . Les participants ayant raté leur reprise de conduite (reprise dangereuse) ont un temps de réaction 20.3% plus long que ceux qui ont réussi leur reprise de conduite (reprise non-dangereuse) (Tableau 16).

Une tendance du genre ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.118$ ) sur la dangerosité de la reprise est observée. Les hommes ont un taux de dangerosité de la reprise de conduite de 46%, alors que le taux des femmes est à 35%.

L'âge est significativement associé à la dangerosité de la reprise (T-Test,  $p = 0.008$ ). La moyenne d'âge des sujets ayant été dangereux sur leur reprise de conduite est de  $47.23 \pm 18.12$  ans, contre  $40.931 \pm 15,78$  ans pour ceux qui ne l'ont pas été. Ce résultat est confirmé lorsque nous observons les catégories d'âge ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.008$ ), les 20-40 ans présentent un taux de dangerosité de 34%, les 41-60 ans un taux à 37%, et les 61-75 ans ont un taux de 58%. (Tableau 16).

	Qualification de la reprise	N	Moyenne	Écart-type	Erreur standard moyenne	P
TOT (s)	Dangereuse	89	2.825	1.061	0.112	0.000
	Non-dangereuse	131	2.348	0.589	0.051	
Âge	Dangereuse	89	47.230	18.126	1.921	0.008
	Non-dangereuse	131	40.931	15.781	1.379	
Durée de la NDRT (s)	Dangereuse	89	308.18	205.721	21.806	0.014
	Non-dangereuse	131	388.73	271.778	23.920	

Tableau 16 : TOT, âge et durée de la NDRT en fonction de la dangerosité de la reprise (Moyenne  $\pm$  écart type).

La nature de la NDRT n'est pas associée à la dangerosité de la reprise ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.62$ ). Cependant, la durée de la NDRT est significativement associée à la dangerosité de la reprise (T-test,  $p = 0.014$ ). Pour les reprises de conduite « non-dangereuse », le temps moyen des NDRT effectuées était de  $386.73 \pm 271.778s$  et pour les NDRT « raté », le temps moyen est de  $308.18 \pm 205.72s$ . Les NDRTs qui ont une durée < 250 secondes et celles dont la durée est comprise entre 250 et 600 secondes présentent plus

de reprises dangereuses (42 et 55 %) que celles dont la durée est supérieure à 600 secondes (23%) ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.004$ ) (Tableau 16).

Variable	P	Catégorie	N	Dangereuse	Non dangereuse	% dangerosité
Age catégorisé	0.008	20-40	113	38	75	34%
		41-60	52	19	33	37%
		61-75	55	32	23	58%
Genre	0.12	Homme	112	51	61	46%
		Femme	108	38	70	35%
Nature de l'évènement	0.005	Travaux	105	52	53	50%
		Obstacle	59	24	35	41%
		Accident	56	13	43	23%
Nature de la NDRT	0.62	Manger	36	14	22	39%
		Lecture	38	17	21	45%
		Conversation	31	14	17	45%
		Jeu	39	19	20	49%
		Radio	37	12	25	32%
		Vidéo	39	13	26	33%
Durée de la NDRT (seconde)	0.003	<250	109	46	63	42%
		>=250 ; <600	55	30	25	55%
		>=600	56	13	43	23%
Implication des mains NDRT	0.76	Non	146	58	98	37%
		Oui	74	31	43	42%
Sollicitation du regard NDRT	0.79	Aucune	104	40	64	38%
		Modérée	78	32	46	41%
		Forte	38	17	21	45%

**Tableau 17 : Pourcentage de reprises dangereuses en fonction de l'âge catégorisé, du genre, des NDRT (nature, durée catégorisée, sollicitation du regard, implication des mains) de la nature de l'évènement.**

Ni la sollicitation du regard de la NDRT ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.79$ ), ni l'implication des mains de la NDRT ne sont associées à la dangerosité de la reprise ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.76$ ).

L'évènement est significativement associé à la dangerosité de la reprise ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.005$ ). Le taux de reprises de conduite considérées comme dangereuses, induit par l'évènement « TRAVAUX » est de 50%. Celui d' « OBSTACLE » est de 41%, et pour « ACCIDENT », il est de 23% (Tableau 17).

En ce qui concerne la vérification des rétroviseurs, elle est dépendante de l'âge (T-test,  $p = 0.001$ ). La moyenne des gens qui ne les consultent pas lors de la reprise en main est de 52.49 ans. Ceux qui les consultent ont un âge moyen de 41.35 ans. Lorsque nous consultons les catégories d'âge ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.000$ ), 12% des 20-40 ans, 11.5% des 41-60 ans et 40% des 61-75 ans ne consultent pas leurs rétroviseurs lors de la reprise en main de la conduite. La vérification des rétroviseurs ne dépend pas de la nature de la NDRT ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.65$ ).

### 2.3.2. Activité cardiaque (ECG)

En prenant en compte les données brutes de l'ECG, nous constatons que TRI (T-test,  $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ) est tendanciellement associée à la dangerosité de la reprise de conduite à travers Q3.

Concernant les données brutes de l'ECG, comparées à la Baseline (% Évolution), nous constatons que FC (T-test,  $p = 0.05$ ,  $\searrow$ ) est significativement associée. Nous observons également une tendance des variables MeanRR (T-test,  $p = 0.08$ ,  $\nearrow$ ) sur la dangerosité de la reprise de conduite en Q3.

N = 210	P	
	Données Brutes	Données en %Évolution
MRRHRV	0.15	0.5
MeanRR	0.53	0.09
FC	0.55	0.051
SDNN	0.8	0.7
RMSSD	0.81	0.42
PNN50	0.29	0.52
TRI	0.13	0.31
TINN	0.46	0.16
SD1	0.81	0.52
SD2	0.68	0.85
SD1/SD2	0.97	0.27
HF	0.53	0.96
LF	0.62	0.55
LF/HF	0.42	0.76

Tableau 18 : Association des variables extraites de la l'activité cardiaque à Q3.

### 2.3.3. Activité cérébrale (EEG)

En prenant en compte les signaux bruts de l'EEG, nous constatons que Frontal-thêta (T-test,  $p = 0.149$ ,  $\searrow$ ) est tendanciellement associé à la dangerosité de la reprise de conduite en Q3.

N = 170	P		(N = 170)	P	
	Données Brutes	Données en %Évolution		Données Brutes	Données en %Évolution
Fz-Delta	0.31	0.76	Pz-Delta	0.48	0.79
Fz-Thêta	0.67	0.9	Pz-Thêta	0.75	0.63
Fz-Alpha-Bas	0.74	0.73	Pz-Alpha-Bas	0.99	0.42
Fz-Alpha-	0.63	0.68	Pz-Alpha-	0.46	0.66
Fz-Beta-Bas	0.61	0.99	Pz-Beta-Bas	0.56	0.6
Fz-Beta-Haut	0.58	0.98	Pz-Beta-Haut	0.54	0.55
Fz-Gamma	0.58	0.63	Pz-Gamma	0.46	0.83
Cz-Delta	0.3	0.75	Oz-Delta	0.43	0.7
Cz-Thêta	0.38	0.52	Oz-Thêta	0.63	0.8
Cz-Alpha-Bas	0.46	0.94	Oz-Alpha-Bas	0.77	1
Cz-Alpha-	0.36	0.96	Oz-Alpha-	0.7	0.93
Cz-Beta-Bas	0.29	0.77	Oz-Beta-Bas	0.71	0.97
Cz-Beta-Haut	0.43	0.77	Oz-Beta-Haut	0.61	1
Cz-Gamma	0.4	0.6	Oz-Gamma	0.63	0.89
Frontal-Thêta	0.15	0.35	Frontal thêta/beta	0.66	0.48
Frontal-Beta	0.15	0.49			

Tableau 19 : Association des variables de l'activité cérébrale à Q3.

Aucunes données brutes de l'EEG comparée à la Baseline (% Évolution) n'ont impact sur la dangerosité de la reprise de conduite en Q3.

### 2.3.4. Activité oculomotrice (Eye-Tracking – OM)

En prenant compte des données brutes de l'Eye-Tracking, le nombre de fixation (T-test,  $p = 0.019$ ,  $\nearrow$ ), la fréquence des fixations (T-test,  $p = 0.017$ ,  $\nearrow$ ) sont significativement associées à la dangerosité de la reprise à travers Q3. Une tendance est observée pour la durée moyenne des fixations (T-test,  $p = 0.06$ ,  $\nearrow$ ) et la distance moyenne des saccades (T-test,  $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ) (Tableau 20).

<i>N = 99</i>	<i>P</i>	
	<b>Données Brutes</b>	<b>Données en %Évolution</b>
<i>Nombre de fixations</i>	0.019	0.35
<i>Fréquence des fixations</i>	0.017	0.17
<i>Durée moyenne des fixations</i>	0.058	0.32
<i>Dispersion moyenne des fixations</i>	0.7	0.24
<i>Diamètre moyen de la pupille</i>	0.98	0.73
<i>Écart-type du diamètre de la pupille</i>	0.2	0.16
<i>Distance moyenne des saccades</i>	0.13	0.16
<i>Écart-type de la distance des saccades</i>	0.4	0.35
<i>Vitesse moyenne des saccades</i>	0.8	0.08
<i>Écart-type de la vitesse des saccades</i>	0.42	0.91
<i>Variation moyenne de la vitesse des saccades</i>	0.9	0.08
<i>Écart-type de la variation de la vitesse des saccades</i>	0.6	0.55
<i>Accélération moyenne des saccades</i>	0.79	0.09
<i>Décélération moyenne des saccades</i>	0.92	0.08

Tableau 20 : Association des variables de l'oculométrie à Q3.

Pour les données brutes de l'OM comparées à la Baseline, une tendance est observée pour la vitesse moyenne des saccades (T-test,  $p = 0.08$ ,  $\nearrow$ ), la variation moyenne de la vitesse des saccades (T-test,  $p = 0.08$ ,  $\nearrow$ ), l'accélération moyenne des saccades (T-test,  $p = 0.09$ ,  $\nearrow$ ) et la décélération moyenne des saccades (T-test,  $p = 0.08$ ,  $\nearrow$ ) (Tableau 20).

## 2.4. A travers la qualification 4 de la reprise

Dans cette section, nous montrons quelles variables (âge et genre du conducteur, de la NDRT (nature, durée, implication des mains, sollicitation du regard), de l'évènements (nature et type de manœuvre), de l'ECG, EEG, et OM) sont associées à la dangerosité de la reprise de conduite à travers la qualification 4 (Q4). Pour rappel, Q4 est déterminée en fonction de la collision et des franchissements de ligne inappropriés (ILC) et ne prend en compte que les reprises en main nécessitant un maintien dans la voie.

### 2.4.1. Age, genre, NDRT et Évènements

Une tendance du genre sur la dangerosité de la reprise est observée (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.12$ ). Les hommes ont un taux de dangerosité de la reprise de conduite de 17%, alors que le taux des femmes est à 29%.

L'âge est significativement associé à la dangerosité de la reprise (T-Test,  $p = 0.012$ ). La moyenne d'âge des sujets n'ayant pas réussi leur reprise de conduite (reprise dangereuse) est de  $51.26 \pm 16.51$  ans

contre  $40.93 \pm 15,78$  ans pour ceux qui ont réussie (reprise non-dangereuse). Ce résultat est confirmé lorsque nous observons les catégories d'âge ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.03$ ), les 20-40 ans présente un taux de dangerosité de 16%, les 41-60 ans un taux à 19% et les 61-75 ans ont un taux de 40%. (Tableau 16).

<i>Variable</i>	<i>P</i>	<i>Catégories</i>	<i>N</i>	<i>Dangereuse</i>	<i>Non Dangereuse</i>	<i>% dangerosité</i>
Age catégorisé	0.030	20-40	58	9	49	16%
		41-60	31	6	25	19%
		61-75	30	12	18	40%
Genre	0.11	Homme	60	10	50	17%
		Femme	59	17	42	29%
Nature de l'évènement	0.46	Abs. Marquage	63	16	47	25%
		Météo	56	11	45	20%
Nature de la NDRT	0.13	Manger	23	7	16	30%
		Lecture	22	2	20	9%
		Conversation	22	4	18	18%
		Jeu	16	6	10	38%
		Radio	19	2	17	11%
		Vidéo	17	6	11	35%
Durée de la NDRT (seconde)	0.019	<250	27	2	25	7%
		>=250 ; <600	61	20	41	33%
		>=600	31	5	26	16%
Implication des mains NDRT	0.59	Non	74	18	56	24%
		Oui	45	9	36	20%
Sollicitation du regard NDRT	0.049	Aucune	64	13	51	20%
		Modérée	33	12	21	36%
		Forte	22	2	20	9%

**Tableau 21 : Pourcentage de reprise dangereuses en fonction de l'âge catégorisé, du genre, des NDRT (nature, durée catégorisée, sollicitation du regard, implication des mains) de la nature de l'évènement.**

Le TOT n'est pas associé à la dangerosité de la reprise (T-Test,  $p = 0.23$ ).

Une tendance de la nature de la NDRT sur la dangerosité de la reprise est observée ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.13$ ). Le taux de dangerosité pour « MANGER » est de 30%, pour la lecture il est de 9%, La conversation présente un taux de 18%. Le jeu vidéo, à un taux de 38%, celui de la radio est de 11% et le visionnage d'un film, 35%.

La durée de la NDRT n'est pas associée à la dangerosité de la reprise (T-test,  $p = 0.43$ ). Cependant, la catégorisation de la durée de la NDRT présente un impact sur la dangerosité de la reprise. Les NDRTs de courtes durées présentent un taux de dangerosité de 7%. Les NDRTs de durée intermédiaire ont un taux de 33%. Pour les NDRT longues, il est de 16%. ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.019$ ) (Tableau 22).

La sollicitation du regard est significativement associée à la dangerosité de la reprise ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.049$ ). Nous constatons que 20% des NDRTs ne sollicitant pas le regard, 36% sollicitant modérément et 9% sollicitant fortement le regard sont considérées comme dangereuses. L'implication des mains n'est pas associée à la dangerosité de la reprise ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.59$ ) (Tableau 21).

L'évènement n'est pas associé à la dangerosité de la reprise ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.45$ ).

En ce qui concerne la présence d'ILC, un impact de l'âge est observé (T-test,  $p = 0.009$ ). L'âge moyen des sujets ayant effectué des ILC est de 51.88 ans. Ceux qui ne présente pas d'ILC sont en moyenne âgés de 41.99). Les sujets âgés de 20-40 ans présente un taux d'ILC de 13%, les 41-60 ans, un taux de 16% et les 61-75 ans présente un taux d'ILC de 40% (Khi<sup>2</sup>,). En revanche la NDRT n'est pas associé à la présence d'ILC (Khi<sup>2</sup>,  $p = 0.24$ ).

Variable	Qualification de la reprise	N	Moyenne	Écart-type	Erreur standard moyenne	P
TOT (s)	Dangereuse	27	2.448	0.534	0.103	0.23
	Non-dangereuse	92	2.632	0.740	0.077	
Âge	Dangereuse	27	51.267	16.5151	3.178	0.012
	Non-dangereuse	92	41.957	16.6113	1.732	
Durée de la NDRT (s)	Dangereuse	27	501.19	372.507	71.689	0.43
	Non-dangereuse	92	568.49	442.130	46.095	

Tableau 22 : TOT, âge et durée de la NDRT en fonction de la dangerosité de la reprise (Moyenne  $\pm$  écart type)

## 2.4.2. Activité cardiaque (ECG)

En prenant en compte les données brutes de l'ECG, nous constatons un impact non significatif des variables SDNN (T-test,  $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ), RMSSD (T-test,  $p = 0.06$ ,  $\nearrow$ ), TRI (T-test,  $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ), SD1 (T-test,  $p = 0.06$ ,  $\nearrow$ ) et SD2 (T-test,  $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ) sur la dangerosité de la reprise de conduite à travers Q4 (Tableau 23).

N = 210	P	
	Données Brutes	Données en %Évolution
MRRHRV	0.19	0.95
MeanRR	0.82	0.4
FC	0.81	0.25
SDNN	0.13	0.7
RMSSD	0.063	0.28
PNN50	0.48	0.73
TRI	0.13	0.43
TINN	0.22	0.051
SD1	0.062	0.28
SD2	0.13	0.73
SD1/SD2	0.83	0.74
HF	0.39	0.85
LF	0.36	0.94
LF/HF	0.46	0.35

Tableau 23 : Association des variables extraites de la variabilité cardiaque à Q4.

Pour les données brutes de l'ECG comparées à la Baseline (% Évolution), nous constatons une significativité de la variable TINN (T-test,  $p = 0.05$ ,  $\nearrow$ ).

### 2.4.3. Activité cérébrale (EEG)

En prenant en compte les données brutes de l'EEG, nous constatons que Frontal thêta/Beta (T-test,  $p = 0.025$ ,  $\uparrow$ ) est significativement associée à la dangerosité de la reprise de conduite à travers Q4. Une tendance est observée pour Oz-Gamma (T-test,  $p = 0.15$ ,  $\searrow$ ).

En revanche, les données brutes de l'EEG comparée à la Baseline (%Évolution) ne sont pas associées à la dangerosité de la reprise de conduite en Q4.

N = 170	P		N = 170	P	
	Données Brutes	Données en %Évolution		Données Brutes	Données en %Évolution
<i>Fz-Delta</i>	0.59	0.38	<i>Pz-Delta</i>	0.33	0.33
<i>Fz-Thêta</i>	0.71	0.51	<i>Pz-Thêta</i>	0.72	0.77
<i>Fz-Alpha-Bas</i>	0.8	0.52	<i>Pz-Alpha-Bas</i>	0.73	0.62
<i>Fz-Alpha-</i>	0.91	0.52	<i>Pz-Alpha-</i>	0.51	0.65
<i>Fz-Beta-Bas</i>	0.88	0.38	<i>Pz-Beta-Bas</i>	0.31	0.51
<i>Fz-Beta-Haut</i>	0.78	0.37	<i>Pz-Beta-Haut</i>	0.3	0.69
<i>Fz-Gamma</i>	0.74	0.84	<i>Pz-Gamma</i>	0.23	0.31
<i>Cz-Delta</i>	0.79	0.88	<i>Oz-Delta</i>	0.57	0.63
<i>Cz-Thêta</i>	0.73	0.94	<i>Oz-Thêta</i>	0.6	0.6
<i>Cz-Alpha-Bas</i>	0.77	0.9	<i>Oz-Alpha-Bas</i>	0.52	0.48
<i>Cz-Alpha-</i>	0.45	0.81	<i>Oz-Alpha-</i>	0.27	0.39
<i>Cz-Beta-Bas</i>	0.33	0.89	<i>Oz-Beta-Bas</i>	0.25	0.46
<i>Cz-Beta-Haut</i>	0.2	0.89	<i>Oz-Beta-Haut</i>	0.16	0.26
<i>Cz-Gamma</i>	0.21	0.59	<i>Oz-Gamma</i>	0.15	0.18
<i>Frontal-Thêta</i>	0.81	0.6	<i>Frontal-Thêta/Beta</i>	0.025	0.78
<i>Frontal-Beta</i>	0.64	0.57			

Tableau 24 : Association des variables de l'activité cérébrale à Q4.

### 2.4.4. Activité oculomotrice (Eye-Tracking – OM)

N = 50	P	
	Données Brutes	Données en %Évolution
<i>Nombre de fixations</i>	0.67	0.68
<i>Fréquence des fixations</i>	0.67	0.77
<i>Durée moyenne des fixations</i>	0.74	0.67
<i>Dispersion moyenne des fixations</i>	0.64	0.068
<i>Diamètre moyen de la pupille</i>	0.034	0.69
<i>Écart-type du diamètre de la pupille</i>	0.37	0.77
<i>Distance moyenne des saccades</i>	0.75	0.21
<i>Écart-type de la distance des saccades</i>	0.22	0.73
<i>Vitesse moyenne des saccades</i>	0.21	0.78
<i>Écart-type de la vitesse des saccades</i>	0.3	0.9
<i>Variation moyenne de la vitesse des saccades</i>	0.21	0.76
<i>Écart-type de la variation de la vitesse des saccades</i>	0.3	0.9
<i>Accélération moyenne des saccades</i>	0.17	0.94
<i>Décélération moyenne des saccades</i>	0.19	0.71

Tableau 25 : Association des variables de l'oculométrie à Q4.

En prenant compte des données brutes de l'Eye-Tracking, le diamètre moyen de la pupille (T-test,  $p = 0.034$ , ↗) est significativement associé à la dangerosité de la reprise de conduite à travers Q4 (Tableau 25).

En prenant compte des données brutes de l'OM comparées à la Baseline (% Évolution), une tendance est observée pour la dispersion moyenne des fixations (T-test,  $p = 0.07$ , ↗).

### 3. Prédiction du Temps de réponse (TOT)

Dans cette section, nous allons tenter de prédire le temps de réponse (TOT), c'est-à-dire le temps que prend le conducteur à désactiver le système autonome pour s'engager dans la conduite à partir de la demande de reprise en main (TOR) par le système. Pour rappel (Chapitre 2:7.3), une Modélisation Linéaire Automatique (ALM) est réalisée pour tenter de prédire le TOT.

Les différentes tentatives de prédiction du TOT dans les points qui suivent sont séparées en fonction du type de manœuvre à effectuer relatif à l'évènement, c'est-à-dire les évènements nécessitant un changement de voie et un maintien dans la voie. Les premières prédictions prennent en compte dans un premier point, les variables typologiques du conducteur, celles de la NDRT (nature, durée, implication des mains et sollicitation du regard) et de l'évènement (nature, et type de manœuvre).

Dans un second point, nous utiliserons les données de l'ECG (brutes et % Évolution), puis ajouterons progressivement les variables typologiques puis les variables de la NDRT (nature, durée, implication des mains et sollicitation du regard) et de la nature de l'évènement ayant une p value <0.15).

Dans un troisième point, nous utiliserons les données de l'EEG (brutes et % Évolution), puis ajouterons progressivement les variables typologiques puis les variables de la NDRT (nature, durée, implication des mains et sollicitation du regard) et de la nature de l'évènement ayant une p value <0.15).

Dans le dernier point, nous utiliserons les données de l'Eye-Tracking (brutes et % Évolution), puis ajouterons progressivement les variables typologiques puis les variables de la NDRT (nature, durée, implication des mains et sollicitation du regard) et de la nature de l'évènement ayant une p value <0.15).

Les différentes variables rentrées dans chaque modèle de prédiction sont les celles ayant une association avec le TOT (Chapitre 3:).

#### 3.1. Prédiction du TOT en prenant compte de l'âge, du genre, de la NDRT et de l'évènement

Pour les reprises en main (N = 220) exigeant un changement de voie, les variables entrées dans le modèle de régression sont la nature de la NDRT (**p = 0.001**), l'implication des mains (**p = 0.020**) la sollicitation du regard (**p = 0.014**) et le genre (**p = 0.02**). Les résultats indiquent que les variables entrées dans l'ALM expliquent la variance du TOT à hauteur de 8,6%.

Concernant les reprises en main (N = 119) nécessitant un maintien dans la voie, les variables entrées dans le modèle de régression sont l'implication des mains (p = 0.06) et la sollicitation du regard (p = 0.13). Les résultats indiquent que les variables entrées dans l'ALM expliquent la variance du TOT à hauteur de 2.1%.

#### 3.2. Prédiction du TOT avec données brutes de l'ECG

En prenant en compte les reprises en mains (N = 210) nécessitant un changement de voie, les variables de l'ECG (brutes) entrées dans le modèle de régression sont SDNN (**p = 0.014**, ↗), RMSSD (p = 0.1, ↗), SD1 (p = 0.1, ↗), SD2 (**p = 0.007**, ↗), LF (**p = 0.014**, ↘), l'âge (p = 0.06) et le genre (**p = 0.003**). Les variables entrées dans le modèle de régression expliquent la variance du TOT à hauteur de 9.7%. Si

nous ajoutons les variables significatives liées à la NDRT (implication des mains ( $p = 0.000$ ) ; sollicitation du regard ( $p = 0.015$ ) et la nature ( $p = 0.001$ ), la variance du TOT est expliquée à 16.2%.

En outre, pour les reprises de conduite ( $N = 119$ ) réclamant un maintien dans la voie, aucune variable de l'ECG n'est significative pour prédire le TOT.

### 3.3. Prédiction du TOT en prenant compte de l'ECG comparées à la Baseline (% Évolution)

En prenant en compte les reprises en mains ( $N = 210$ ) nécessitant un changement de voie, les variables de l'ECG (% Évolution) entrées dans le modèle de régression sont MRRHRV ( $p = 0.015$ , ↗), SDNN ( $p = 0.001$ , ↗), RMSSD ( $p = 0.015$ , ↗), PNN50 ( $p = 0.059$ , ↗), TRI ( $p = 0.046$ , ↗), SD1 ( $p = 0.015$ , ↗), SD2 ( $p = 0.000$ , ↗), LF ( $p = 0.022$ , ↘), l'âge ( $p = 0.06$ ) et le genre ( $p = 0.003$ ). Les résultats indiquent une prédiction de la variance du TOT à 7.5%. Enfin, si nous ajoutons les variables significatives liées à la NDRT (implication des mains ( $p = 0.000$ ) ; sollicitation du regard ( $p = 0.015$ ) et la nature ( $p = 0.001$ ), le score monte à 17%.

Concernant les reprises en main ( $N = 112$ ) nécessitant un maintien dans la voie, les variables entrées dans le modèle de régression sont MRRHRV ( $p = 0.130$ , ↗), RMSSD ( $p = 0.13$ , ↗), SD1 ( $p = 0.12$ , ↗), HF ( $p = 0.118$ , ↘), l'âge ( $p = 0.27$ ) et le genre ( $p = 0.88$ ). Les résultats indiquent une explication de la variance du TOT à 2.3%. Si nous ajoutons les variables significatives liées à la NDRT (implication des mains ( $p = 0.000$ ), sollicitation du regard ( $p = 0.015$ ) et la nature ( $p = 0.001$ ), le score de prédiction de la variance du TOT est de 4.2%.

### 3.4. Prédiction du TOT en prenant compte des données brutes de l'EEG

Pour les reprises en main ( $N = 170$ ) nécessitant un changement de voie, les variables de l'EEG (brutes) entrées dans le modèle de régression sont Pz-Delta ( $p = 0.07$ , ↘) Pz-Thêta ( $p = 0.047$ , ↘) Pz-Alpha-Bas ( $p = 0.08$ , ↘), Pz-Beta-Bas ( $p = 0.07$ , ↘), Pz-Beta-Haut ( $p = 0.022$ , ↘), l'âge ( $p = 0.28$ ) et le genre ( $p = 0.026$ ). Le modèle permet de prédire 7.3 % de la variance du TOT. Enfin, si nous ajoutons les variables significatives liées à la NDRT (implication des mains ( $p = 0.004$ ) ; sollicitation du regard ( $p = 0.006$ ), la durée ( $p = 0.15$ ) et la nature ( $p = 0.015$ ), le score monte à 11.8%.

Et pour les reprises en main ( $N = 89$ ) nécessitant un maintien dans la voie, les variables entrées dans le modèle de régression sont Fz-Delta ( $p = 0.15$ , ↘) Cz-Delta ( $p = 0.09$ , ↘) Pz-Thêta ( $p = 0.14$ , ↘), Pz-Alpha-Bas ( $p = 0.12$ , ↘) Pz-Alpha-Haut ( $p = 0.14$ , ↘), Pz-Beta-Haut ( $p = 0.15$ , ↘), Pz-Gamma ( $p = 0.05$ , ↘), Oz-Delta ( $p = 0.036$ , ↘), Oz-Alpha-Bas ( $p = 0.11$ , ↘), Oz-Alpha-Haut ( $p = 0.11$ , ↘) Oz-Beta-bas ( $p = 0.13$ , ↘), Oz-Gamma ( $p = 0.14$ , ↘), l'âge ( $p = 0.98$ ) et le genre ( $p = 0.96$ ). Nous constatons une explication de la variance du TOT à hauteur de 3.9%. Puis lorsque nous rajoutons implication des mains de la NDRT ( $p = 0.035$ ) et la sollicitation du regard de la NDRT ( $p = 0.11$ ) au modèle le score est de 9.8%.

### 3.5. Prédiction du TOT en prenant compte des données de l'EEG comparées à la Baseline (% Évolution)

En prenant en compte les reprises en mains ( $N = 170$ ) requérant un changement de voie, les variables de la EEG (% Évolution) entrées dans le modèle de régression sont Fz-Delta ( $p = 0.006$ , ↗), Fz-Thêta ( $p = 0.008$ , ↗), Fz-Alpha-Bas ( $p = 0.07$ , ↗), Fz-Alpha-Haut ( $p = 0.11$ , ↗), Fz-Beta-Bas ( $p = 0.02$ , ↗), Fz-Beta-

Haut ( $p = 0.08$ , ↗), Fz-Gamma ( $p = 0.019$ , ↗), Cz-Delta ( $p = 0.08$ , ↗), Cz-Thêta ( $p = 0.043$ , ↗), Cz-Gamma ( $p = 0.045$ , ↗), Pz-Alpha-Bas ( $p = 0.07$ , ↘), Pz-Alpha-Haut ( $p = 0.11$ , ↘), Pz-Beta-Haut ( $p = 0.026$ , ↗), Pz-Gamma ( $p = 0.09$ , ↘). Les résultats indiquent une explication de la variance à 23.1%. Si nous ajoutons les variables significatives liées à la NDRT (implication des mains ( $p = 0.004$ ), sollicitation du regard ( $p = 0.006$ ), la durée ( $p = 0.15$ ) et la nature ( $p = 0.015$ ), la variance est expliquée à 27.8%.

Et concernant les reprises en main ( $N = 89$ ) nécessitant un maintien dans la voie, les variables entrées dans le modèle de régression sont Fz-Thêta ( $p = 0.008$ , ↗), Fz-Beta-Bas ( $p = 0.02$ , ↗), Fz-Beta-Haut ( $p = 0.08$ , ↗), Fz-Gamma ( $p = 0.019$ , ↗), Cz-Thêta ( $p = 0.043$ , ↗), Cz-Gamma ( $p = 0.045$ , ↗), l'âge ( $p = 0.98$ ) et le genre ( $p = 0.96$ ). Les résultats indiquent que les variables entrées dans l'ALM expliquent la variance du TOT à hauteur de 5.3%. Lorsque nous rajoutons l'implication des mains de la NDRT ( $p = 0.035$ ) et la sollicitation du regard de la NDRT ( $p = 0.11$ ) au modèle, le score est de 6.6%.

### 3.6. Prédiction du TOT en prenant compte des données brutes de l'Eye-Tracking

Pour les reprises en main ( $N = 99$ ) nécessitant un changement de voie, les variables de l'OM (brutes) entrées dans le modèle de régression sont le diamètre moyen de la pupille ( $p = 0.000$ , ↗), la distance moyenne des saccades ( $p = 0.008$ , ↘), l'écart-type de la distance des saccades ( $p = 0.09$ , ↘), l'écart-type de la vitesse des saccades ( $p = 0.14$ , ↘), l'écart-type de la variation de la vitesse des saccades ( $p = 0.09$ , ↘), l'âge ( $p = 0.005$ ) et le genre ( $p = 0.3$ ). Les variables entrées dans le modèle de régression expliquent la variance du TOT à hauteur de 29.7%. Lorsque nous ajoutons et la nature de la NDRT ( $p = 0.13$ ) et l'implication des mains de la NDRT ( $p = 0.034$ ), la variance du TOT est expliqué à 33.2%.

Et en prenant en compte les reprises en main ( $N = 50$ ) nécessitant un maintien dans la voie, les variables entrées dans le modèle de régression sont le nombre de fixations ( $p = 0.04$ , ↗), la fréquence des fixations ( $p = 0.039$ , ↗), le diamètre moyen de la pupille ( $p = 0.002$ , ↗), la distance moyenne des saccades ( $p = 0.11$ , ↘), l'écart-type de la distance des saccades ( $p = 0.096$ , ↘), l'âge ( $p = 0.031$ ) et le genre ( $p = 0.99$ ). Les résultats indiquent une explication de la variance à 16.2%.

### 3.7. Prédiction du TOT en prenant compte des données de l'OM comparées à la Baseline (% Évolution)

Pour les reprises en main ( $N = 99$ ) nécessitant un changement de voie, les variables de l'OM (% Évolution) entrées dans le modèle de régression sont la durée moyenne des fixations ( $p = 0.035$ , ↘), la dispersion moyenne des fixations ( $p = 0.000$ , ↗), l'âge ( $p = 0.005$ ) et le genre ( $p = 0.31$ ). La variance du TOT est ainsi expliqué à 19.5%. En ajoutant la nature de la NDRT ( $p = 0.13$ ) et l'implication des mains de la NDRT ( $p = 0.034$ ) au modèle, le score monte à 20.5%.

Et pour les reprises en main ( $N = 50$ ) nécessitant un maintien dans la voie, les variables entrées dans le modèle de régression sont la durée moyenne des fixations ( $p = 0.035$ , ↘), la dispersion moyenne des fixations ( $p = 0.000$ , ↗), l'âge ( $p = 0.031$ ) et le genre ( $p = 0.99$ ). Les résultats indiquent une explication de la variance du TOT à 18.7%.

## 4. Prédiction de la dangerosité de la reprise de conduite.

### 4.1. Qualification 1

#### 4.1.1. Age, genre, NDRT et évènements (N = 220)

Les variables ayant une association avec Q1 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : la nature de l'évènement ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.000$ ) et la durée de la NDRT (T-test,  $p = 0.000$ ).

Le modèle a retenu la nature de l'évènement ( $\text{Exp}(B) = 2.54$ ,  $p = 0.000$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 26) montrent toutes les reprises en main observées comme dangereuses sont prédites comme des reprises non-dangereuses et les reprises en main considérées comme non-dangereuses sont prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 1 et indique que le modèle prédit parfaitement les reprises de conduite non-dangereuses. A l'inverse, le score de spécificité, qui est égal à 0 montre que le modèle est incapable de prédire les reprises de conduites dangereuses. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0, reflète l'incapacité du modèle, à travers la nature de l'évènement et Q1, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	0	60	Spécificité = 0	Youden = 0
<i>Non-dangerosité observée</i>	0	160	Sensibilité = 1	

Tableau 26 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers la nature de l'évènement, en prenant en compte Q1. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

#### 4.1.2. Données brutes de l'ECG (N = 199)

Les variables ayant une association avec Q1 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : RMSSD (T-test,  $p = 0.14$ ,  $\searrow$ ), SD1 (T-test,  $p = 0.14$ ,  $\searrow$ ) et LF/HF (T-test,  $p = 0.141$ ,  $\nearrow$ ). L'âge ( $p = 0.18$ ) et le genre ( $p = 0.05$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu le genre ( $\text{Exp}(B) = 0.54$ ,  $p = 0.057$ ) et LF/HF ( $\text{Exp}(B) = 2.07$ ,  $p = 0.11$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

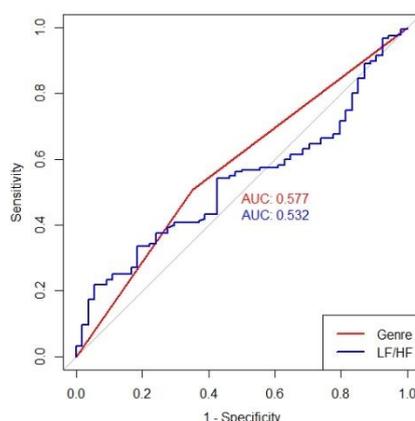
Les résultats (Tableau 27) montrent toutes les reprises en main observées comme dangereuses sont prédites comme des reprises non-dangereuses et les reprises en main considérées comme non-dangereuses sont prédites comme non-dangereuses.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	0	54	Spécificité = 0	Youden = 0
<i>Non-dangerosité observée</i>	0	155	Sensibilité = 1	

**Tableau 27 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers les données de l'ECG brutes, en prenant en compte Q1. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).**

Le score de sensibilité du modèle est égal à 1 et indique que le modèle prédit parfaitement les reprises de conduite non-dangereuses. A l'inverse, le score de spécificité, qui est égal à 0 montre que le modèle est incapable de prédire les reprises de conduites dangereuses. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0, reflète l'incapacité du modèle, à travers l'ECG brute et Q1, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que le genre (AUC = 0.577) et LF/HF (AUC = 0.532) longent la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction s'apparente au hasard (Figure 36) et ne sont donc pas fiables pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q1.



**Figure 36 : Courbes ROC des variables, du genre et de l'ECG brute retenues dans le modèle de prédiction de Q1.**

#### **4.1.3. ECG comparée à la Baseline (N = 199)**

Aucune variable n'est significative pour prédire la dangerosité de la reprise en prenant en compte Q1.

#### **4.1.4. Données brutes de l'EEG (N = 168)**

Aucune variable n'est significative pour prédire la dangerosité de la reprise en prenant en compte Q1.

#### **4.1.5. EEG comparée à la Baseline (N = 168)**

Aucune variable n'est significative pour prédire la dangerosité de la reprise en prenant en compte Q1.

#### **4.1.6. Données brutes de l'OM (N = 99)**

Aucune variable n'est significative pour prédire la dangerosité de la reprise en prenant en compte Q1.

#### 4.1.7. OM comparée à la Baseline (N = 99)

Les variables ayant une association avec Q1 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : la durée moyenne des fixations ( $p = 0.08$ , ↗), et la dispersion moyenne des fixations (T-test,  $p = 0.09$ , ↘). L'âge ( $p = 0.38$ ) et le genre ( $p = 0.42$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu la durée moyenne des fixations ( $\text{Exp}(B) = 1.1$ ,  $p = 0.155$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 28) montrent toutes les reprises en main observées comme dangereuses sont prédites comme des reprises non-dangereuses et les reprises en main considérées comme non-dangereuses sont prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 1 et indique que le modèle prédit parfaitement les reprises de conduite non-dangereuses. A l'inverse, le score de spécificité, qui est égal à 0 montre que le modèle est incapable de prédire les reprises de conduites dangereuses. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0, reflète l'incapacité du modèle, à travers la OM comparée à la Baseline et Q1, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	0	22	Spécificité = 0	Youden = 0
<i>Non-dangerosité observée</i>	0	77	Sensibilité = 1	

Tableau 28 : *Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers la OM comparée à la Baseline, en prenant en compte Q1. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).*

La courbe ROC de la variable retenue dans le modèle montre graphiquement que la durée moyenne des fixations ( $\text{AUC} = 0.609$ ) se situe légèrement au-dessus de la courbe de référence. Son AUC montre que sa puissance de prédiction est faible (Figure 37) et ne peut donc retenue comme une prétendante à la prédiction de la dangerosité de la reprise dans le cas de Q1.

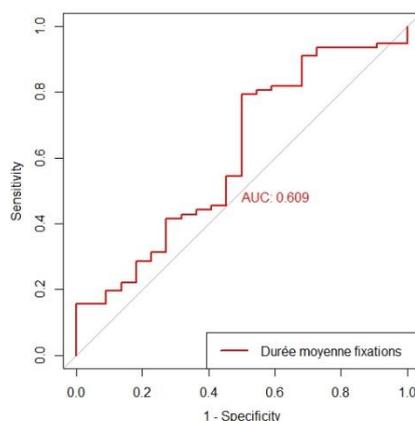


Figure 37 : *Courbe ROC de la variable de la OM comparée à la Baseline retenue dans le modèle de prédiction de Q1.*

#### 4.1.8. Données brutes de l'OM, EEG et ECG (N = 76)

Aucune variable n'est significative pour prédire la dangerosité de la reprise en prenant en compte Q1.

#### 4.1.9. Données de l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 76)

Aucune variable n'est significative pour prédire la dangerosité de la reprise en prenant en compte Q1.

#### 4.1.10. Données brutes de l'EEG et ECG (N = 165)

Les variables ayant une association avec Q1 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : MRRHRV ( $p = 0.09$ ,  $\searrow$ ), TRI ( $p = 0.1$ ,  $\searrow$ ), Frontal Thêta ( $p = 0.12$ ,  $\searrow$ ) et Frontal Beta ( $p = 0.14$ ,  $\searrow$ ). L'âge ( $p = 0.034$ ) et le genre ( $p = 0.027$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.98$ ,  $p = 0.044$ ) et le genre ( $\text{Exp}(B) = 1.97$ ,  $p = 0.041$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 29) montrent toutes les reprises en main observées comme dangereuses sont prédites comme des reprises non-dangereuses et les reprises en main considérées comme non-dangereuses sont prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 1 et indique que le modèle prédit parfaitement les reprises de conduite non-dangereuses. A l'inverse, le score de spécificité, qui est égal à 0 montre que le modèle est incapable de prédire les reprises de conduites dangereuses. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0, reflète l'incapacité du modèle, à travers la OM comparée à la Baseline et Q1, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	15	50	Spécificité = 0	Youden = 0
<i>Non-dangerosité observée</i>	14	86	Sensibilité = 1	

Tableau 29 : *Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et le genre, en prenant en compte Q1. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).*

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.536) et le genre (AUC = 0.591) longent la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction s'apparente au hasard (Figure 38) et ne sont donc pas fiables pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q1.

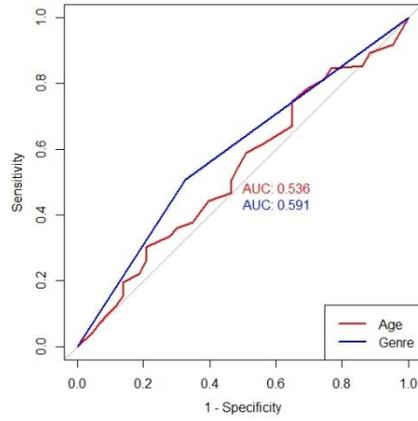


Figure 38 : Courbes ROC des variables de l'âge et du genre retenues dans le modèle de prédiction de Q1.

#### 4.1.11. EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 165)

Aucune variable n'est significative pour prédire la dangerosité de la reprise en prenant en compte Q1.

## 4.2. Qualification 2

### 4.2.1. Age, genre, NDRT et événements (N = 220)

Les variables ayant une association avec Q2 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : l'âge ( $p = 0.008$ ), la nature de l'évènement ( $\text{Khi}^2$ ,  $p = 0.004$ ) et la durée de la NDRT ( $p = 0.019$ ).

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.98$ ,  $p = 0.007$ ) et la nature de l'évènement ( $\text{Exp}(B) = 1.73$ ,  $p = 0.002$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 30) montrent 72 reprises en main sur les 111 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 62 reprises en main sur les 109 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.57 et indique que la prédiction des reprises non-dangereuses est faible. Le score de spécificité, qui est égal à 0.65 indique que la prédiction des reprises dangereuses est faible. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.22, reflète l'incapacité du modèle, à travers l'âge et la nature de l'évènement et Q2, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	72	39	Spécificité = 0.65	Youden = 0.22
<i>Non-dangerosité observée</i>	47	62	Sensibilité = 0.57	

Tableau 30 : *Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et la nature de l'évènement, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).*

### 4.2.2. Données brutes de l'ECG (N = 210)

Les variables ayant une association avec Q2 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : PNN50 ( $p = 0.039$ ,  $\nearrow$ ) et SD1/SD2 ( $p = 0.038$ ,  $\nearrow$ ), MRRHRV ( $p = 0.06$ ,  $\nearrow$ ), MeanRR ( $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ), et FC ( $p = 0.1$ ,  $\searrow$ ). L'âge ( $p = 0.05$ ) et le genre ( $p = 0.91$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu SD1/SD2 ( $\text{Exp}(B) = 6.04$ ,  $p = 0.07$ ) et l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.99$ ,  $p = 0.08$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 31) montrent 55 reprises en main sur les 102 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 69 reprises en main sur les 108 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.64 et indique que le modèle peine à prédire correctement les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.54 indique que la prédiction des reprises « dangereuses » est très proche du hasard. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.18, reflète l'incapacité du modèle, à travers l'ECG brute et Q2, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	Dangerosité prédite	Non-dangerosité prédite	Performances	
Dangerosité observée	55	47	Spécificité = 0.54	Youden = 0.18
Non-dangerosité observée	39	69	Sensibilité = 0.64	

Tableau 31 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'ECG brute, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.566) et SD1/SD2 (AUC = 0.574) longent la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction s'apparente au hasard (Figure 39) et ne sont donc pas fiables pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q2.

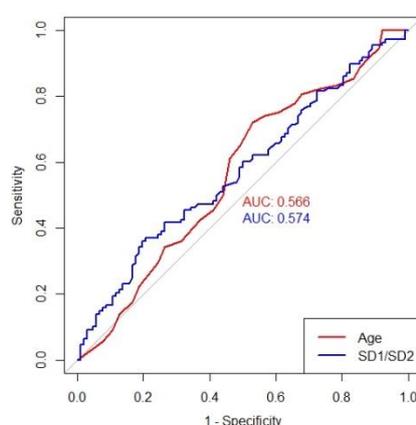


Figure 39 : Courbes ROC des variables de l'âge, et de l'ECG brute retenues dans le modèle de prédiction de Q2.

#### 4.2.3. ECG comparée à la Baseline (N = 209)

Les variables ayant une association avec Q2 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : MeanRR (p= **0.001**, ↗), FC (p= **0.000**, ↘) et SD1/SD2 (p= **0.002**, ↗) et LF/HF LF/HF (p= 0.06, ↘). L'âge (p = **0.05**) et le genre (p = 0.91) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu FC (Exp(B) = 0.97, p = **0.021**) et SD1/SD2 (Exp(B) = 1, p = 0.09) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 32) montrent 60 reprises en main sur les 102 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 72 reprises en main sur les 108 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.67 et indique que le modèle peine à prédire correctement les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.59 indique que la prédiction des reprises dangereuses est faible. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.26, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'ECG comparée à la Baseline et Q2, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	Dangerosité prédite	Non-dangerosité prédite	Performances	
Dangerosité observée	60	42	Spécificité = 0.59	Youden = 0.26
Non-dangerosité observée	35	72	Sensibilité = 0.67	

Tableau 32 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'ECG comparée à la Baseline, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que la FC (AUC = 0.647) et SD1/SD2 (AUC = 0.622) s'élèvent timidement au-dessus de la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction est peu performante (Figure 40) et ont un faible pouvoir pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q2.

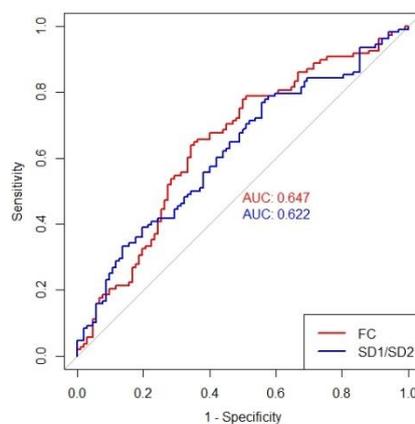


Figure 40 : Courbes ROC des variables de l'ECG comparée à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q2.

#### 4.2.4. Données brutes de l'EEG (N = 168)

Les variables ayant une association avec Q2 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : Fz-Delta ( $p=0.024$ ,  $\searrow$ ), Cz-Delta ( $p=0.032$ ,  $\searrow$ ), Cz-Beta-Bas ( $p=0.032$ ,  $\searrow$ ), Cz-Beta-Haut ( $p=0.03$ ,  $\searrow$ ), Cz-Gamma ( $p=0.025$ ,  $\searrow$ ), Frontal-thêta ( $p=0.008$ ,  $\searrow$ ), Frontal-beta ( $p=0.018$ ,  $\searrow$ ), Fz-Thêta ( $p=0.06$ ,  $\searrow$ ), Fz-Alpha-Bas ( $p=0.06$ ,  $\searrow$ ), Fz-Alpha-Haut ( $p=0.07$ ,  $\searrow$ ), Fz-Beta-Bas ( $p=0.06$ ,  $\searrow$ ), Fz-Beta-Haut ( $p=0.05$ ,  $\searrow$ ), Fz-Gamma ( $p=0.09$ ,  $\searrow$ ), Cz-Thêta ( $p=0.13$ ,  $\searrow$ ), Cz-Alpha-Bas ( $p=0.07$ ,  $\searrow$ ), Cz-Alpha-Haut ( $p=0.05$ ,  $\searrow$ ), Oz-Delta ( $p=0.09$ ,  $\searrow$ ). L'âge ( $p=0.008$ ) et le genre ( $p=0.99$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.97$ ,  $p = 0.008$ ), Frontal Thêta ( $\text{Exp}(B) = 0.85$ ,  $p = 0.021$ ) et Frontal Beta ( $\text{Exp}(B) = 1.13$ ,  $p = 0.08$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 33) montrent 42 reprises en main sur les 84 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 59 reprises en main sur les 84 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.7 et indique que le modèle prédit moyennement les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.5 indique que la prédiction des reprises dangereuses est égale du hasard. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est

égale à 0.2, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'EEG brute et Q2, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	42	42	Spécificité = 0.5	Youden = 0.2
<i>Non-dangerosité observée</i>	25	59	Sensibilité = 0.7	

Tableau 33 : *Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG brute, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).*

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.600) et Frontal thêta (AUC = 0.605) se situent légèrement au-dessus de la courbe de référence et Frontal Beta (AUC = 0.580) la longe. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction est peu performante (Figure 41) et ont un faible pouvoir pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q2.

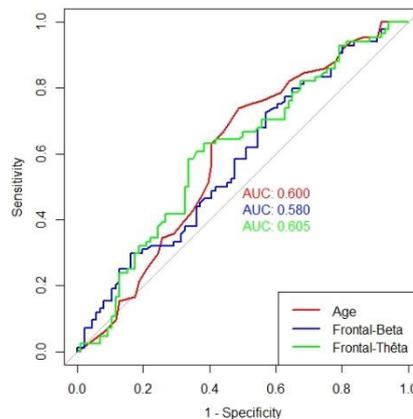


Figure 41: *Courbes ROC des variables de l'EEG brute retenues dans le modèle de prédiction de Q2.*

#### 4.2.5. EEG comparée à la Baseline (N = 169)

Les variables ayant une association avec Q2 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : Fz-Delta ( $p=0.050$ , ↗) et Frontal-Thêta ( $p=0.021$ , ↘), Fz-Thêta ( $p=0.07$ , ↘), Fz-Alpha-Bas ( $p=0.05$ , ↘), Fz-Alpha-Haut ( $p=0.14$ , ↘), Fz-Beta-Bas ( $p=0.15$ , ↘), Fz-Beta-Haut ( $p=0.14$ , ↘), Fz-Gamma ( $p=0.11$ , ↘), Cz-Delta ( $p=0.12$ , ↘), Cz-Alpha-Bas ( $p=0.08$ , ↘), Cz-Alpha-Haut ( $p=0.12$ , ↘), Cz-Beta-Bas ( $p=0.14$ , ↘), Cz-Beta-Haut ( $p=0.11$ , ↘), Cz-Gamma ( $p=0.7$ , ↘) et Frontal-Beta ( $p=0.06$ , ↘). L'âge ( $p=0.008$ ) et le genre ( $p=0.99$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.97$ ,  $p = 0.005$ ), Fz-Delta ( $\text{Exp}(B) = 0.98$ ,  $p = 0.022$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 34) montrent 50 reprises en main sur les 85 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 52 reprises en main sur les 84 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.62 et indique que le modèle prédit moyennement les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.59 indique que la prédiction des reprises en main dangereuses est faible. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.21, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'EEG comparée à la Baseline et Q2, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	50	35	Spécificité = 0.59	Youden = 0.21
<i>Non-dangerosité observée</i>	32	52	Sensibilité = 0.62	

Tableau 34 : *Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG comparée à la Baseline, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).*

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.600) et Fz-Delta (AUC = 0.597) se situent légèrement au-dessus de la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction est peu performante (Figure 42) et ont un faible pouvoir pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q2.

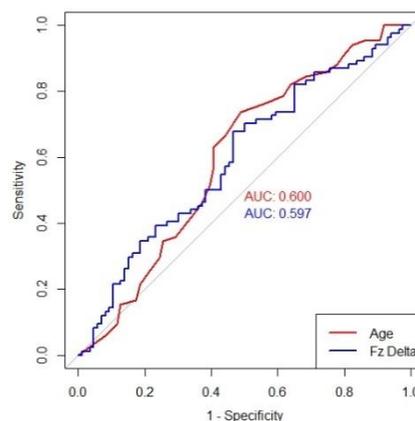


Figure 42 : *Courbes ROC des variables de l'âge et de l'EEG comparée à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q2*

#### 4.2.6. Données brutes de l'OM (N = 99)

Les variables ayant une association avec Q2 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : La durée moyenne des fixations ( $p= 0.039$ , ↗), le diamètre moyen de la pupille ( $p= 0.052$ , ↗), l'écart type de la distance des saccades ( $p= 0.14$ , ↘), la vitesse moyenne des saccades ( $p= 0.11$ , ↘), l'écart-type de la vitesse des saccades (T-test,  $p = 0.13$ , ↘), la moyenne de la variation de la vitesse des saccades ( $p= 0.11$ , ↗), l'écart-type de la variation de la vitesse des saccades ( $p= 0.08$ , ↘), l'accélération moyenne des saccades ( $p= 0.13$ , ↘) et la décélération moyenne des saccades ( $p= 0.1$ , ↗). L'âge ( $p = 0.005$ ) et le genre ( $p = 0.7$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu « l'âge » ( $\text{Exp}(B) = 0.97$ ,  $p = 0.007$ ), « la durée moyenne des fixations » ( $\text{Exp}(B) = 1.01$ ,  $p = 0.11$ ) et « la décélération moyenne des saccades » ( $\text{Exp}(B) = 1$ ,  $p = 0.12$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

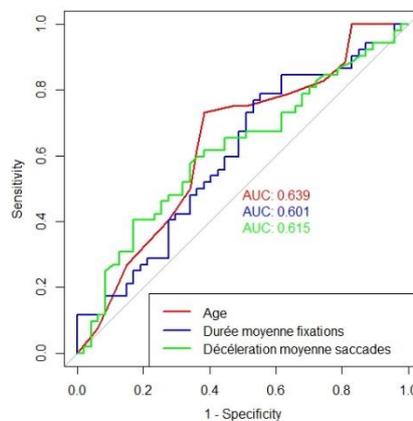
Les résultats (Tableau 35) montrent 27 reprises en main sur les 47 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 38 reprises en main sur les 52 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.73 et indique que le modèle prédit moyennement les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.57 indique que la prédiction des reprises en main dangereuses est faible. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.30, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'OM brute et Q2, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	27	20	Spécificité = 0.57	Youden = 0.3
<i>Non-dangerosité observée</i>	14	38	Sensibilité = 0.73	

**Tableau 35 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers OM brute, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).**

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.639), la durée moyenne des fixations (AUC = 0.601) et la décélération moyenne des saccades (AUC = 0.615) se situent légèrement au-dessus de la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction est peu performante (Figure 43) et ont un faible pouvoir pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q2.



**Figure 43 : Courbes ROC des variables de l'âge et de l'OM brute retenues dans le modèle de prédiction de Q2.**

#### **4.2.7. OM comparée à la Baseline (N = 99)**

Les variables ayant une association avec Q2 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : la durée moyenne des fixations ( $p = 0.14$ , ↗), l'écart-type du diamètre de la pupille ( $p = 0.07$ , ↘) et l'écart type de la distance des saccades ( $p = 0.07$ , ↘). L'âge ( $p = 0.005$ ) et le genre ( $p = 0.7$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.97$ ,  $p = 0.005$ ), et la durée moyenne des fixations ( $\text{Exp}(B) = 1.03$ ,  $p = 0.12$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

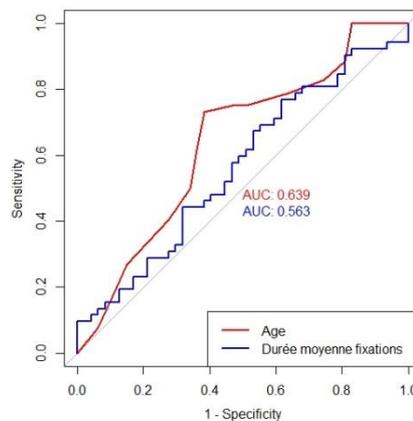
Les résultats (Tableau 36) montrent 27 reprises en main sur les 47 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 39 reprises en main sur les 52 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.75 et indique que le modèle prédit moyennement les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.57 indique que la prédiction des reprises en main dangereuses est faible. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.32, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'OM comparée à la Baseline et Q2, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	27	20	Spécificité = 0.57	Youden = 0.32
<i>Non-dangerosité observée</i>	13	39	Sensibilité = 0.75	

**Tableau 36 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers OM comparée à la Baseline, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).**

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.639) se situe légèrement au-dessus de la courbe de référence et la durée moyenne des fixations (AUC = 0.563) la longe. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction est peu performante (Figure 44) et ont un faible pouvoir pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q2.



**Figure 44 : Courbes ROC des variables de l'âge et de l'OM comparée à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q2.**

#### 4.2.8. Données brutes de l'OM, EEG et ECG (N = 71)

Les variables ayant une association avec Q2 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : SDNN ( $p = 0.09$ ,  $\searrow$ ), RMSSD ( $p = 0.028$ ,  $\searrow$ ), SD1 ( $p = 0.028$ ,  $\searrow$ ), SD2 ( $p = 0.13$ ,  $\searrow$ ), SD1/SD2 ( $p = 0.15$ ,  $\searrow$ ), Fz-Delta ( $p = 0.025$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Thêta ( $p = 0.028$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Alpha-Bas ( $p = 0.032$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Alpha-Haut ( $p = 0.021$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Beta-Bas ( $p = 0.022$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Beta-Haut ( $p = 0.025$ ,  $\nearrow$ ), Fz-Gamma ( $p = 0.034$ ,  $\nearrow$ ), Cz-Delta ( $p = 0.007$ ,  $\nearrow$ ), Cz-Thêta ( $p = 0.011$ ,  $\nearrow$ ), Cz-Alpha-Bas ( $p = 0.017$ ,  $\nearrow$ ), Cz-Alpha-Haut ( $p = 0.015$ ,  $\nearrow$ ), Cz-Beta-Bas ( $p = 0.009$ ,  $\nearrow$ ), Cz-Beta-Haut ( $p = 0.008$ ,  $\nearrow$ ), Cz-Gamma ( $p = 0.008$ ,  $\nearrow$ ), Pz-Delta ( $p = 0.018$ ,  $\nearrow$ ), Pz-Thêta ( $p = 0.041$ ,  $\nearrow$ ), Pz-Alpha-Bas ( $p = 0.075$ ,  $\nearrow$ ), Pz-Alpha-Haut ( $p = 0.043$ ,  $\nearrow$ ), Pz-Beta-Bas ( $p = 0.021$ ,  $\nearrow$ ), Pz-Beta-Haut ( $p = 0.013$ ,  $\nearrow$ ), Pz-Gamma ( $p = 0.007$ ,  $\nearrow$ ), Oz-Delta ( $p = 0.060$ ,  $\nearrow$ ), Total Frontal ( $p = 0.006$ ,  $\nearrow$ ), Frontal Thêta ( $p =$

**0.005, ↗**), Frontal Beta (**p = 0.006, ↗**), Durée moyenne des fixations (**p = 0.037, ↘**), Diamètre moyen de la pupille (**p = 0.045, ↘**). L'âge (**p = 0.007**) et le genre (**p = 0.874**) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu Frontal Thêta (Exp(B) = 1.1, **p = 0.040**), la durée moyenne des fixations (Exp(B) = 0.98, **p = 0.06**) et le diamètre moyen de la pupille (Exp(B) = 0.95, **p = 0.15**) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

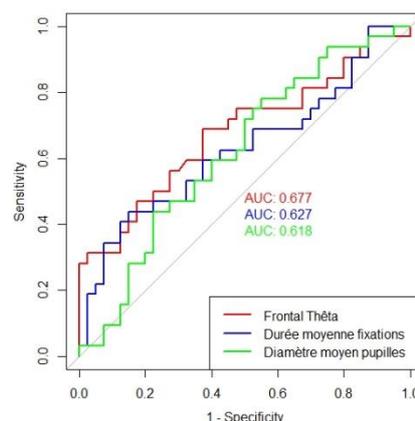
Les résultats (Tableau 37) montrent 36 reprises en main sur les 40 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 19 reprises en main sur les 31 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.61 et indique que la prédiction des reprises non-dangereuses est faible. Le score de spécificité, qui est égal à 0.9 indique que la prédiction des reprises en main « dangereuses » du modèle est très bonne. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.51, reflète une efficacité moyenne du modèle, à travers l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline et Q2, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<b>Dangerosité prédite</b>	<b>Non-dangerosité prédite</b>	<b>Performances</b>	
<b>Dangerosité observée</b>	36	4	Spécificité = 0.9	Youden = 0.51
<b>Non-dangerosité observée</b>	12	19	Sensibilité = 0.61	

**Tableau 37 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'OM, EEG et ECG brutes, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).**

La courbe ROC de la variable retenue dans le modèle montre graphiquement que Frontal Thêta (AUC=0.677), la durée moyenne des fixations (AUC=0.627) et le diamètre moyen de la pupille (AUC=0.618) se situe au-dessus de la courbe de référence. L'AUC de Frontal Thêta montre que cette variable pourrait prétendre à être candidat pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q2 (Figure 45).



**Figure 45 : Courbes ROC des variables de l'EEG et de l'OM brutes retenues dans le modèle de prédiction de Q2.**

#### 4.2.9. Données de l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 72)

Les variables ayant une association avec Q2 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : MeanRR, ( $p = 0.013$ , ↗), FC ( $p = 0.028$ , ↘), SDNN ( $p = 0.1$ , ↗), SD2 ( $p = 0.06$ , ↗) et SD1/SD2 ( $p = 0.13$ , ↗), Cz-Delta ( $p = 0.11$ , ↘), Cz-Thêta ( $p = 0.1$ , ↘), Frontal Total ( $p = 0.12$ , ↘), Frontal Thêta ( $p = 0.034$ , ↘), Frontal Beta ( $p = 0.12$ , ↘), Frontal Thêta/Beta ( $p = 0.010$ , ↗). L'âge ( $p = 0.007$ ) et le genre ( $p = 0.874$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 1.05$ ,  $p = 0.013$ ), SD1/SD2 ( $\text{Exp}(B) = 0.002$ ,  $p = 0.025$ ), Frontal Thêta ( $\text{Exp}(B) = 1.2$ ,  $p = 0.008$ ) et Frontal Beta ( $\text{Exp}(B) = 0.87$ ,  $p = 0.028$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 38) montrent 34 reprises en main sur les 40 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 19 reprises en main sur les 32 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

	Dangerosité prédite	Non-dangerosité prédite	Performances	
Dangerosité observée	34	6	Spécificité = 0.85	Youden = 0.44
Non-dangerosité observée	13	19	Sensibilité = 0.59	

Tableau 380. : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers OM, EEG et ECG comparées à la Baseline, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.59 et indique que la prédiction des reprises non-dangereuses est faible. Le score de spécificité, qui est égal à 0.85 indique que la prédiction des reprises en main « dangereuses » du modèle est très bonne. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.44, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline et Q2, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

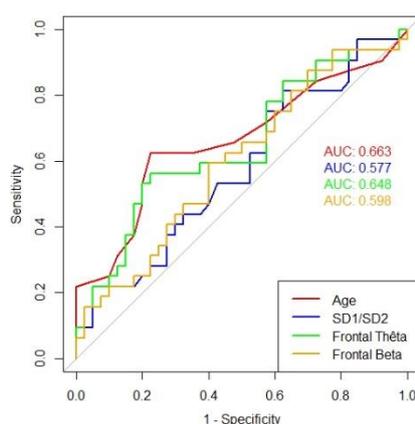


Figure 46 : Courbes ROC des variables de l'âge, de l'EEG et ECG comparées à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q2.

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montre graphiquement que l'âge (AUC=0.663) et Frontal Thêta (AUC=0.648) se situent au-dessus de la courbe de référence. Les courbes de SD1/SD2 (AUC=0.577) Frontal Beta (AUC=0.598) la longe. L'AUC de l'âge et de Frontal Thêta montrent qu'elles

pourraient prétendre à être candidat pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q2 (Figure 46).

#### 4.2.10. Données brutes de l'EEG et ECG (N = 161)

Les variables ayant une association avec Q2 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : MRRHRV ( $p = 0.031$ , ↗), MeanRR ( $p = 0.094$ , ↘), FC ( $p = 0.043$ , ↘), PNN50 ( $p = 0.032$ , ↗), SD1/SD2 ( $p = 0.029$ , ↗), Fz-Delta ( $p = 0.016$ , ↘), Fz-Thêta ( $p = 0.04$ , ↘), Fz-Alpha-Bas ( $p = 0.04$ , ↘), Fz-Alpha-Haut ( $p = 0.043$ , ↘), Fz-Beta-Bas ( $p = 0.045$ , ↘), Fz-Beta-Haut ( $p = 0.05$ , ↘), Fz-Gamma ( $p = 0.07$ , ↘), Cz-Delta ( $p = 0.021$ , ↘), Cz-Thêta ( $p = 0.09$ , ↘), Cz-Beta-Bas ( $p = 0.024$ , ↘), Cz-Beta-haut ( $p = 0.032$ , ↘), Cz-Gamma ( $p = 0.019$ , ↘), Pz-Delta ( $p = 0.135$ , ↘), Pz-Alpha-Haut ( $p = 0.13$ , ↘), Oz-Delta ( $p = 0.06$ , ↘), Oz-Beta-Haut ( $p = 0.15$ , ↘), Oz-Gamma ( $p = 0.13$ , ↘), Total Frontal ( $p = 0.017$ , ↘), Frontal Thêta ( $p = 0.005$ , ↘), Frontal Beta ( $p = 0.017$ , ↘). L'âge ( $p = 0.035$ ) et le genre ( $p = 0.68$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu SD1/SD2 (Exp(B) = 12.22,  $p = 0.028$ ), Cz-Thêta (Exp(B) = 1.1,  $p = 0.155$ ), Frontal Thêta (Exp(B) = 0.88,  $p = 0.027$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 39) montrent 44 reprises en main sur les 79 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 61 reprises en main sur les 82 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.74 et indique que le modèle prédit moyennement les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.55 indique que la prédiction des reprises en main « dangereuses » est proche du hasard. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.29, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'EEG et ECG brutes, et Q2 à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	44	35	Spécificité = 0.55	Youden = 0.29
<i>Non-dangerosité observée</i>	21	61	Sensibilité = 0.74	

Tableau 39 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG et ECG brutes, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montre graphiquement que SD1/SD2 (AUC=0.596) et Cz-Thêta (AUC=0.579) longent la courbe de référence, et Frontal Thêta (AUC=0.619) se situent légèrement au-dessus de la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction est peu performante (Figure 47) et ont un faible pouvoir pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q2.

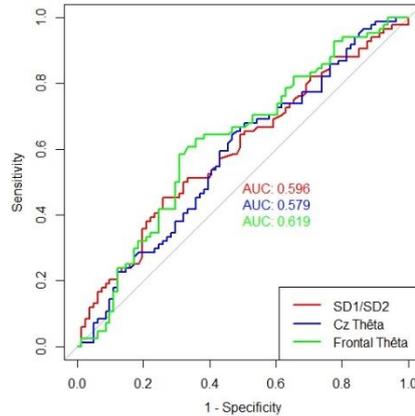


Figure 47 : Courbes ROC des variables de l'EEG et ECG brutes retenues dans le modèle de prédiction de Q2.

#### 4.2.11. EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 164)

Les variables ayant une association avec Q2 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : MeanRR ( $p = 0.002$ , ↗), FC ( $p = 0.000$ , ↘), SD1/SD2 ( $p = 0.001$ , ↗), HF ( $p = 0.1$ , ↘), LF/HF ( $p = 0.05$ , ↘), Fz-Delta ( $p = 0.05$ , ↘), Fz-Thêta ( $p = 0.09$ , ↘), Fz-Alpha-Bas ( $p = 0.07$ , ↘), Fz-Gamma ( $p = 0.15$ , ↘), Cz-Delta ( $p = 0.14$ , ↘), Cz-Alpha-Bas ( $p = 0.1$ , ↘), Cz-Beta-Haut ( $p = 0.15$ , ↘), Cz-Gamma ( $p = 0.09$ , ↘). L'âge ( $p = 0.035$ ) et le genre ( $p = 0.68$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.98$ ,  $p = 0.15$ ), MeanRR ( $\text{Exp}(B) = 0.95$ ,  $p = 0.13$ ), FC ( $\text{Exp}(B) = 0.93$ ,  $p = 0.037$ ), SD1/SD2 ( $\text{Exp}(B) = 1.007$ ,  $p = 0.049$ ), et Fz-Delta ( $\text{Exp}(B) = 0.98$ ,  $p = 0.023$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 40) montrent 48 reprises en main sur les 80 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 59 reprises en main sur les 84 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.70 et indique que le modèle prédit moyennement les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.60 indique que la prédiction des reprises en main « dangereuses » est faible. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.30, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'EEG et ECG comparées à la Baseline, et Q2 à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	Dangerosité prédite	Non-dangerosité prédite	Performances	
Dangerosité observée	48	32	Spécificité = 0.6	Youden = 0.3
Non-dangerosité observée	25	59	Sensibilité = 0.7	

Tableau 40 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG et ECG comparées à la Baseline, en prenant en compte Q2. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montre graphiquement que MeanRR (AUC=0.670) et FC (AUC=0.670) et SD1/SD2 (AUC=0.646) se situent au-dessus de la courbe de référence et, l'âge (AUC=0.598) et Fz-Delta (AUC=0.598) se situent légèrement au-dessus de la courbe

de référence. L'AUC de MeanRR et de FC montrent qu'elles pourraient prétendre à être candidat pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q2 (Figure 48).

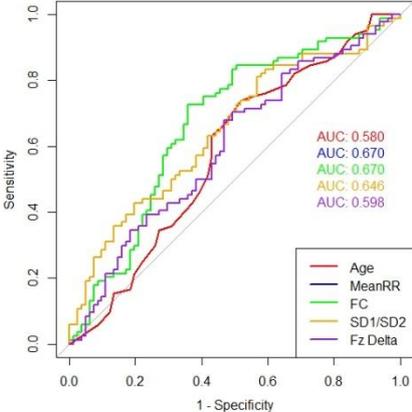


Figure 48 : Courbes ROC des variables de l'âge, de l'EEG et ECG comparées à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q2.

### 4.3. Qualification 3

#### 4.3.1. Age, genre, NDRT et évènements (N = 220)

Les variables ayant une association avec Q3 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : l'âge ( $p=0.008$ ), le genre ( $\text{Khi}^2$ ,  $p=0.12$ ), la nature de l'évènement ( $\text{Khi}^2$ ,  $p=0.005$ ) et la durée de la NDRT ( $p=0.014$ ).

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.977$ ,  $p = 0.006$ ), le genre ( $\text{Exp}(B) = 1.53$ ,  $p = 0.14$ ) et la nature de l'évènement ( $\text{Exp}(B) = 1.77$ ,  $p = 0.002$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 41) montrent 32 reprises en main sur les 89 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 104 reprises en main sur les 131 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.79 et indique que la prédiction des reprises non-dangereuses est bonne. Le score de spécificité, qui est égal à 0.36 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.15, reflète l'incapacité du modèle, à travers l'âge, le genre, la nature de l'évènement et Q3, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	32	57	Spécificité = 0.36	Youden = 0.15
<i>Non-dangerosité observée</i>	27	104	Sensibilité = 0.79	

Tableau 41 : *Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge, le genre et la nature de l'évènement, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).*

#### 4.3.2. Données brutes de l'ECG (N = 210)

L'unique variable ayant une association avec Q3 est rentrée dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Cette variable est : TRI ( $p=0.13$ ,  $\nearrow$ ). L'âge ( $p=0.019$ ) et le genre ( $p=0.06$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.98$ ,  $p = 0.023$ ) et le genre ( $\text{Exp}(B) = 0.61$ ,  $p = 0.09$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 42) montrent 14 reprises en main sur les 83 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 112 reprises en main sur les 127 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.88 et indique que le modèle prédit très bien les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.17 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.05 reflète l'incapacité du modèle, à travers l'ECG brute et Q3, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	14	69	Spécificité = 0.17	Youden = 0.05
<i>Non-dangerosité observée</i>	15	112	Sensibilité = 0.88	

Tableau 42 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'ECG brute, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montre graphiquement que l'âge (AUC=0.595) et le genre (AUC=0.567) longent la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction s'apparente au hasard (Figure 49) et ne sont donc pas fiables pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q3.

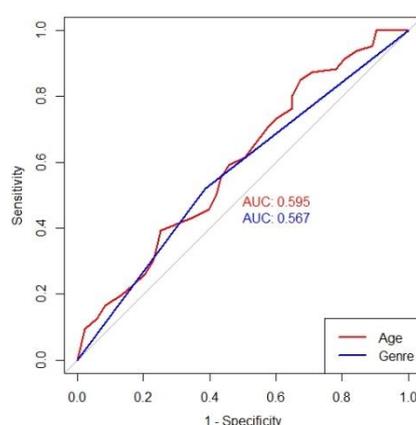


Figure 49 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de l'ECG brute retenues dans le modèle de prédiction de Q3.

#### 4.3.3. ECG comparée à la Baseline (N = 210)

Les variables ayant une association avec Q3 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : MeanRR ( $p = 0.09$ , ↗) et FC ( $p = 0.05$ , ↘). L'âge ( $p = 0.019$ ) et le genre ( $p = 0.57$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.98$ ,  $p = 0.041$ ), le genre ( $\text{Exp}(B) = 0.62$ ,  $p = 0.1$ ) et FC ( $\text{Exp}(B) = 0.99$ ,  $p = 0.11$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 43) montrent 22 reprises en main sur les 83 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 106 reprises en main sur les 127 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	22	61	Spécificité = 0.27	Youden = 0.11
<i>Non-dangerosité observée</i>	21	106	Sensibilité = 0.84	

Tableau 43 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'ECG comparée à la Baseline, en prenant en compte Q3.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.84 et indique que le modèle prédit très bien les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.27 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.11 reflète l'incapacité du modèle, à travers l'ECG comparée à la Baseline et Q3, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montre graphiquement que l'âge (AUC=0.595) et le genre (AUC=0.567) et la FC (AUC=0.572) longent la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction s'apparente au hasard (Figure 50) et ne sont donc pas fiables pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q3.

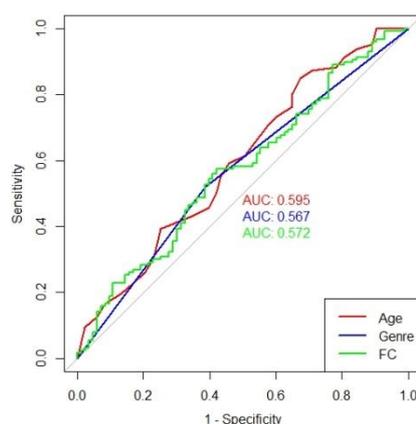


Figure 50 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de l'ECG comparée à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q3 et le score de la sensibilité, de la spécificité et l'indice de Youden du modèle.

#### 4.3.4. Données brutes de l'EEG (N = 170)

L'unique variable ayant une association avec Q3 est rentrée dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Cette variable est : Frontal-thêta ( $p = 0.149$ ,  $\sphericalangle$ ). L'âge ( $p = 0.020$ ) et le genre ( $p = 0.045$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.98$ ,  $p = 0.020$ ) et le genre ( $\text{Exp}(B) = 1.88$ ,  $p = 0.05$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 44) montrent 15 reprises en main sur les 68 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 88 reprises en main sur les 102 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

	Dangerosité prédite	Non-dangerosité prédite	Performances	
Dangerosité observée	15	53	Spécificité = 0.22	Youden = 0.08
Non-dangerosité observée	14	88	Sensibilité = 0.86	

Tableau 44 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG brute, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.86 et indique que le modèle prédit très bien les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.22 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.08 reflète l'incapacité du modèle, à travers l'ECG brute et Q3, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montre graphiquement que l'âge (AUC=0.606) et le genre (AUC=0.578) longent la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction s'apparente au hasard (Figure 51) et ne sont donc pas fiables pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q3.

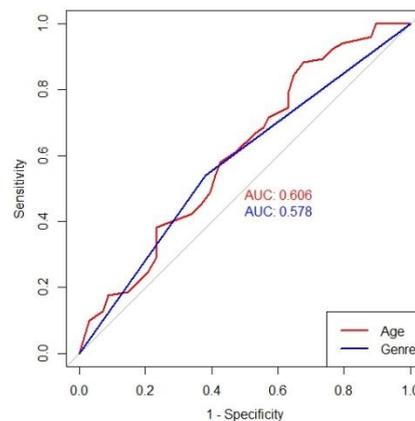


Figure 51 : Courbes ROC des variables de l'âge et du genre retenues dans le modèle de prédiction de Q3.

#### 4.3.5. EEG comparée à la Baseline (N = 170)

Aucune variable n'est significative pour prédire la dangerosité de la reprise en prenant en compte Q3.

#### 4.3.6. Données brutes de l'OM (N = 99)

Les variables ayant une association avec Q3 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : le nombre de fixation ( $p=0.019$ ,  $\nearrow$ ), la fréquence des fixations ( $p=0.017$ ,  $\nearrow$ ), la durée moyenne des fixations ( $p=0.06$ ,  $\nearrow$ ) et la distance moyenne des saccades ( $p=0.13$ ,  $\nearrow$ ). L'âge ( $p=0.034$ ) et le genre ( $p=0.34$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.98$ ,  $p = 0.11$ ), la fréquence des fixations ( $\text{Exp}(B) = 2.35$ ,  $p = 0.005$ ), la durée moyenne des fixations ( $\text{Exp}(B) = 1.01$ ,  $p = 0.1$ ) et la distance moyenne des saccades ( $\text{Exp}(B) = 1.01$ ,  $p = 0.014$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 45) montrent 24 reprises en main sur les 44 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 43 reprises en main sur les 55 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.78 et indique que la prédiction des reprises de conduite non-dangereuses est bonne. Le score de spécificité, qui est égal à 0.55 indique que la prédiction des reprises en main dangereuses est faible. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.33,

reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'OM brute et Q3, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	24	20	Spécificité = 0.55	Youden = 0.33
<i>Non-dangerosité observée</i>	12	43	Sensibilité = 0.78	

Tableau 45 : *Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'OM Brute, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).*

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.609), la durée moyenne des fixations (AUC = 0.611) et la distance moyenne des saccades (AUC = 0.606) se situent légèrement au-dessus de la courbe de référence. Quant à la fréquence des fixations (AUC=0.658) elle se situe au-dessus de la courbe de référence et son AUC montre qu'elle pourrait prétendre à être candidat pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q3 (Figure 52).

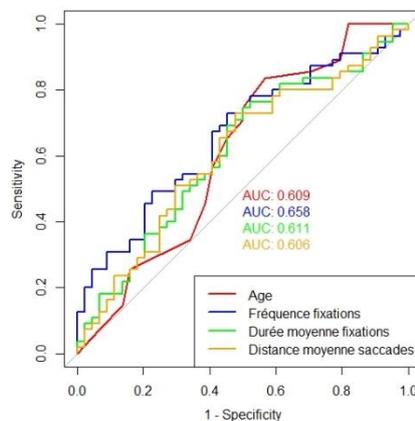


Figure 52 : *Courbes ROC des variables de l'âge et de la OM brute retenues dans le modèle de prédiction de Q3.*

#### 4.3.7. OM comparée à la Baseline (N = 99)

Les variables ayant une association avec Q3 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : la vitesse moyenne des saccades ( $p= 0.08$ , ↗), la variation moyenne de la vitesse des saccades ( $p= 0.08$ , ↗), l'accélération moyenne des saccades ( $p= 0.09$ , ↗) et la décélération moyenne des saccades ( $p= 0.08$ , ↗). L'âge ( $p = 0.034$ ) et le genre ( $p = 0.34$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge (Exp(B) = 0.98,  $p = 0.033$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 46) montrent 22 reprises en main sur les 44 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 41 reprises en main sur les 55 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.75 et indique que la prédiction des reprises de conduite non-dangereuses est bonne. Le score de spécificité, qui est égal à 0.5 indique que la prédiction des reprises en main dangereuses égale au hasard. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à

0.25, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'OM comparée à la Baseline et Q3, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	22	22	Spécificité = 0.5	Youden = 0.25
<i>Non-dangerosité observée</i>	14	41	Sensibilité = 0.75	

Tableau 46 : *Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'OM comparée à la Baseline, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).*

La courbe ROC de la variable retenue dans le modèle montre graphiquement que l'âge (AUC = 0.609), se situe légèrement au-dessus de la courbe de référence. Son AUC montre que sa puissance de prédiction est faible (Figure 53) et n'est donc pas fiables pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q3.

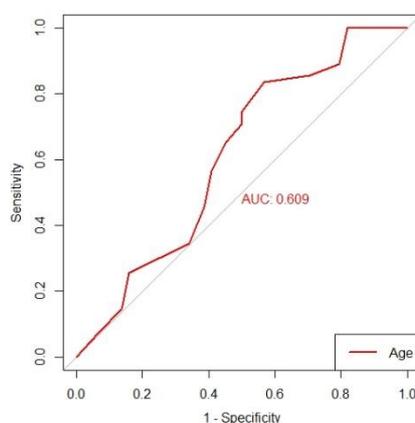


Figure 53 : *Courbe ROC de la variable de l'âge, retenue dans le modèle de prédiction de Q3.*

#### 4.3.8. Données brutes de l'OM, EEG et ECG (N = 71)

Les variables ayant une association avec Q3 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : Fz-Delta ( $p = 0.000$ ,  $\searrow$ ), Fz-Thêta ( $p = 0.000$ ,  $\searrow$ ), Fz-Alpha-Bas ( $p = 0.002$ ,  $\searrow$ ), Fz-Alpha-haut ( $p = 0.004$ ,  $\searrow$ ), Fz-Beta-Bas ( $p = 0.006$ ,  $\searrow$ ), Fz-Beta-haut ( $p = 0.013$ ,  $\searrow$ ), Fz-Gamma ( $p = 0.028$ ,  $\searrow$ ), Cz-Delta ( $p = 0.008$ ,  $\searrow$ ), Cz-Thêta ( $p = 0.008$ ,  $\searrow$ ), Cz-Alpha-Bas ( $p = 0.042$ ,  $\searrow$ ), Cz-Alpha-Haut ( $p = 0.06$ ,  $\searrow$ ), Cz-Beta-Bas ( $p = 0.07$ ,  $\searrow$ ), Cz-Beta-Haut ( $p = 0.09$ ,  $\searrow$ ), Pz-Thêta ( $p = 0.06$ ,  $\searrow$ ), Pz-Gamma ( $p = 0.15$ ,  $\searrow$ ), Oz-Delta ( $p = 0.028$ ,  $\searrow$ ), Oz-Thêta ( $p = 0.035$ ,  $\searrow$ ), Oz-Alpha-Bas ( $p = 0.07$ ,  $\searrow$ ), Oz-Gamma ( $p = 0.1$ ,  $\searrow$ ), Frontal Thêta/Beta ( $p = 0.019$ ,  $\searrow$ ) et écart-type du diamètre de la pupille ( $p = 0.122$ ,  $\searrow$ ). L'âge ( $p = 0.19$ ) et le genre ( $p = 0.47$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 1.03$ ,  $p = 0.030$ ) et l'écart-type du diamètre de la pupille ( $\text{Exp}(B) = 1.09$ ,  $p = 0.93$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

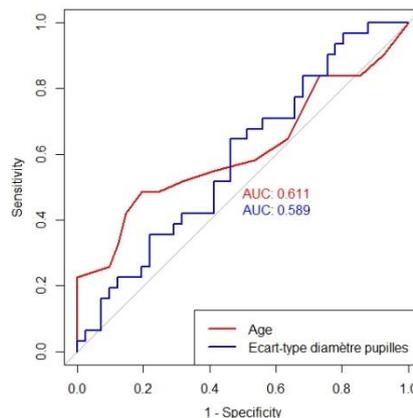
Les résultats (Tableau 47) montrent 33 reprises en main sur les 40 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 15 reprises en main sur les 31 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.48 et indique qu'indique que la prédiction des reprises non-dangereuses est proche du hasard. Le score de spécificité, qui est égal à 0.83 indique que la prédiction des reprises en main « dangereuses » du modèle est très bonne. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.31, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'OM, EEG et ECG brutes et Q3, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	33	7	Spécificité = 0.83	Youden = 0.31
<i>Non-dangerosité observée</i>	16	15	Sensibilité = 0.48	

**Tableau 47 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers la OM, EEG et ECG brute, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).**

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.611) et l'écart-type du diamètre de la pupille (AUC = 0.589) longent la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction s'apparente au hasard (Figure 54) et ne sont donc pas fiables pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q3.



**Figure 54 : Courbes ROC des variables de l'âge et l'OM brute retenues dans le modèle de prédiction de Q3.**

#### **4.3.9. Données de l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 72)**

Les variables ayant une association avec Q3 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : PNN50 ( $p= 0.012$ ,  $\nearrow$ ), TRI ( $p= 0.128$ ,  $\nearrow$ ) et SD1/SD2 ( $p= 0.080$ ,  $\nearrow$ ). L'âge ( $p = 0.045$ ) et le genre ( $p = 0.2$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 1.03$ ,  $p = 0.046$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 48) montrent 22 reprises en main sur les 44 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 41 reprises en main sur les 55 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

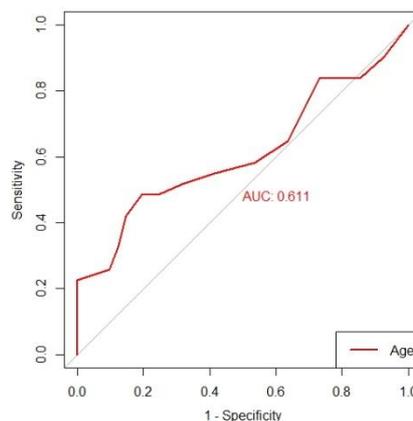
Le score de sensibilité du modèle est égal à 1 et indique que le modèle prédit parfaitement les reprises de conduite non-dangereuses. A l'inverse, le score de spécificité, qui est égal à 0 montre que le modèle

est incapable de prédire les reprises de conduites dangereuses. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0, reflète l'incapacité du modèle, à travers l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline et Q3, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	0	41	Spécificité = 0	Youden = 0
<i>Non-dangerosité observée</i>	0	31	Sensibilité = 1.00	

**Tableau 48 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers la OM, EEG et ECG comparée à la Baseline, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).**

La courbe ROC de la variable retenue dans le modèle montre graphiquement que l'âge (AUC = 0.611), se situe légèrement au-dessus de la courbe de référence. Son AUC montre que sa puissance de prédiction est faible (Figure 55) et n'est donc pas fiables pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q3.



**Figure 55: Courbe ROC de la variable de l'âge retenue dans le modèle de prédiction de Q3.**

#### **4.3.10. Données brutes de l'EEG et ECG (N = 165)**

Les variables ayant une association avec Q3 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : MRRHRV ( $p= 0.012$ ,  $\nearrow$ ) et TRI ( $p= 0.13$ ,  $\nearrow$ ). L'âge ( $p = 0.034$ ) et le genre ( $p = 0.027$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.98$ ,  $p = 0.005$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 49) montrent 15 reprises en main sur les 65 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 86 reprises en main sur les 100 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

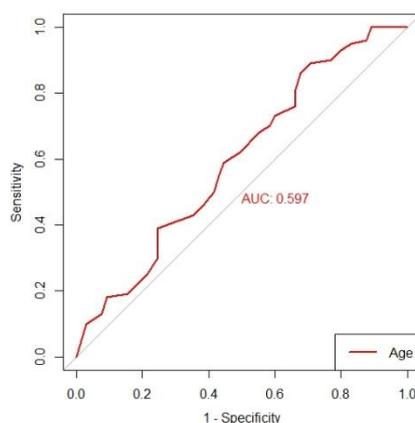
Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.86 et indique que le modèle prédit très bien les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.23 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale

à 0.09, reflète l'incapacité du modèle, à travers l'OM et EEG Brutes et Q3, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	15	50	Spécificité = 0.23	Youden = 0.09
<i>Non-dangerosité observée</i>	14	86	Sensibilité = 0.86	

**Tableau 49 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG et ECG brutes, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).**

La courbe ROC de la variable retenue dans le modèle montre graphiquement que l'âge (AUC = 0.597), longe la courbe de référence. Son AUC montre que sa puissance de prédiction est faible (Figure 56) et n'est donc pas fiables pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q3.



**Figure 56: Courbe ROC de la variable de l'âge retenue dans le modèle de prédiction de Q3.**

#### **4.3.11. EEG et ECG comparée à la Baseline (N = 165)**

Les variables ayant une association avec Q3 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : FC ( $p = 0.13$ ,  $\searrow$ ) et TINN ( $p = 0.056$ ,  $\nearrow$ ). L'âge ( $p = 0.034$ ) et le genre ( $p = 0.027$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.98$ ,  $p = 0.11$ ), le genre ( $\text{Exp}(B) = 2.09$ ,  $p = 0.029$ ) et TINN ( $\text{Exp}(B) = 1$ ,  $p = 0.12$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

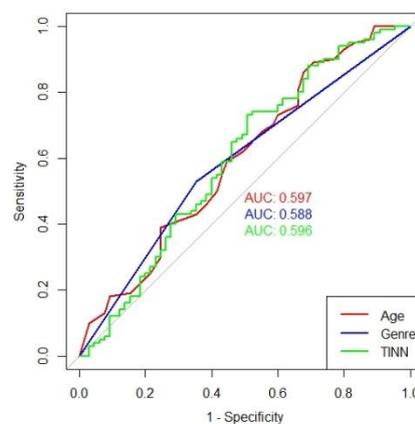
Les résultats (Tableau 50) montrent 19 reprises en main sur les 65 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 81 reprises en main sur les 100 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.81 et indique que la prédiction des reprises de conduite non-dangereuses est bonne. Le score de spécificité, qui est égal à 0.29 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.1, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'OM et EEG comparée à la Baseline et Q3, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	19	46	Spécificité = 0.29	Youden = 0.1
<i>Non-dangerosité observée</i>	19	81	Sensibilité = 0.81	

**Tableau 50 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge, le genre et l'ECG comparée à la Baseline, en prenant en compte Q3. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).**

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.597), le genre (AUC = 0.588) et TINN (AUC = 0.596) longent la courbe de référence. Leurs AUC montrent que leur puissance de prédiction est faible (Figure 57) et ne sont donc pas fiables pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q3.



**Figure 57: Courbe ROC de la variable de l'âge retenue dans le modèle de prédiction de Q3.**

## 4.4. Qualification 4

### 4.4.1. Age, genre, NDRT et événements (N = 119)

Les variables ayant une association avec Q4 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : l'âge ( $K\chi^2$ ,  $p = 0.012$ ), le genre ( $p = 0.11$ ), la nature de la NDRT ( $K\chi^2$ ,  $p = 0.13$ ), la durée catégorisée de la NDRT ( $p = 0.019$ ) et la sollicitation du regard ( $p = 0.000$ ).

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.97$ ,  $p = 0.012$ ) et le genre ( $\text{Exp}(B) = 0.47$ ,  $p = 0.47$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 51) montrent toutes les reprises en main observées comme dangereuses sont prédites comme des reprises non-dangereuses et les reprises en main considérées comme non-dangereuses sont prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 1 et indique que le modèle prédit parfaitement les reprises de conduite non-dangereuses. A l'inverse, le score de spécificité, qui est égal à 0 montre que le modèle est incapable de prédire les reprises de conduites dangereuses. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0, reflète l'incapacité du modèle, à travers l'âge, le genre et Q4, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	Dangerosité prédite	Non-dangerosité prédite	Performances	
Dangerosité observée	0	27	Spécificité = 0	Youden = 0
Non-dangerosité observée	0	92	Sensibilité = 1	

Tableau 51 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et le genre, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

### 4.4.2. Données brutes de l'ECG (N = 112)

Les variables ayant une association avec Q4 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : SDNN ( $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ), RMSSD ( $p = 0.06$ ,  $\nearrow$ ), TRI ( $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ), SD1 ( $p = 0.06$ ,  $\nearrow$ ) et SD2 ( $p = 0.13$ ,  $\nearrow$ ). L'âge ( $p = 0.007$ ) et le genre ( $p = 0.1$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.96$ ,  $p = 0.005$ ) et le genre ( $\text{Exp}(B) = 2.53$ ,  $p = 0.06$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 52) montrent 4 reprises en main sur les 26 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 79 reprises en main sur les 86 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.92 et indique que le modèle prédit très bien les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.15 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.07 reflète l'incapacité du modèle, à travers l'ECG brute et Q4, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	4	22	Spécificité = 0.15	Youden = 0.07
<i>Non-dangerosité observée</i>	7	79	Sensibilité = 0.92	

Tableau 52 : *Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et le genre, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).*

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.674) est au-dessus de la courbe de référence et pourrait prétendre à être candidat pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q4. Le genre (AUC = 0.593) longe la courbe de référence et montre que sa puissance de prédiction est faible (Figure 58).

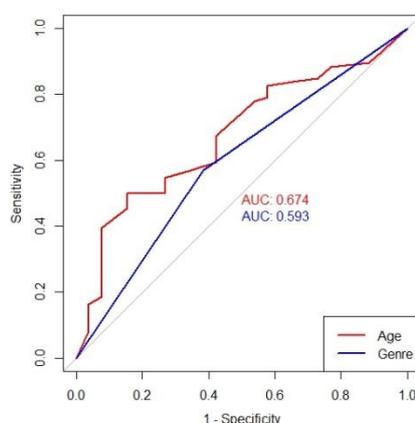


Figure 58 : *Courbe ROC des variables de l'âge, du genre retenues dans le modèle de prédiction de Q4.*

#### 4.4.3. ECG comparée à la Baseline (N = 112)

La variable ayant une association avec Q4 est rentrée dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Cette variable est : TINN ( $p = 0.05$ ,  $\nearrow$ ). L'âge ( $p = 0.007$ ) et le genre ( $p = 0.1$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.96$ ,  $p = 0.005$ ) et le genre ( $\text{Exp}(B) = 2.53$ ,  $p = 0.06$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 53) montrent 4 reprises en main sur les 26 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 79 reprises en main sur les 86 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	4	22	Spécificité = 0.15	Youden = 0.07
<i>Non-dangerosité observée</i>	7	79	Sensibilité = 0.92	

Tableau 53 : *Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et le genre, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).*

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.92 et indique que le modèle prédit très bien les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.15 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.07 reflète l'incapacité du modèle, à travers l'ECG comparée à la Baseline et Q4, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.674) est au-dessus de la courbe de référence et pourrait prétendre à être candidat pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q4. Le genre (AUC = 0.593) longe la courbe de référence et montre que sa puissance de prédiction est faible (Figure 59).

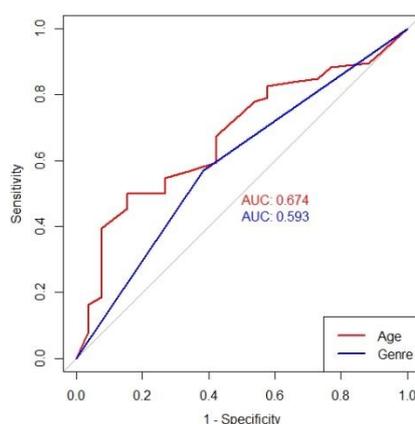


Figure 59 : Courbe ROC des variables de l'âge et du genre retenues dans le modèle de prédiction de Q4

#### 4.4.4. Données brutes de l'EEG (N = 89)

Les variables ayant une association avec Q4 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : Frontal thêta/Beta ( $p= 0.025$ , ↗) et Oz-Gamma ( $p= 0.15$ , ↘). L'âge ( $p = 0.13$ ) et le genre ( $p = 0.34$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu Frontal Thêta/Beta ( $\text{Exp}(B) = 2558.28$ ,  $p = 0.027$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 54) montrent 1 reprises en main sur les 20 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 69 reprises en main sur les 69 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

	Dangerosité prédite	Non-dangerosité prédite	Performances	
Dangerosité observée	1	19	Spécificité = 0.05	Youden = 0.05
Non-dangerosité observée	0	69	Sensibilité = 1	

Tableau 54 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG brute, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Le score de sensibilité du modèle est égal à 1 et indique que le modèle prédit parfaitement les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.05 indique que le modèle est

incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.05 reflète l'incapacité du modèle, à travers l'ECG brute et Q4, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

La courbe ROC de la variable retenue dans le modèle montre graphiquement que Frontal Thêta/Beta (AUC = 0.660), est au-dessus de la courbe de référence et pourrait prétendre à être candidat pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q4 (Figure 60).

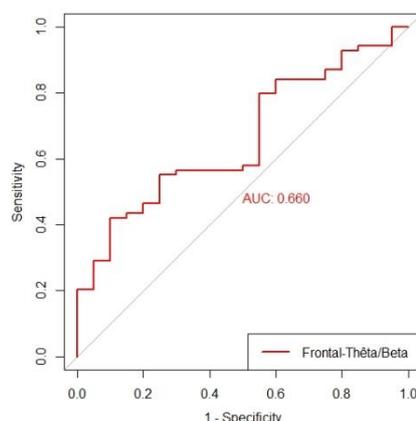


Figure 60 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de l'EEG brute retenues dans le modèle de prédiction de Q4 et le score de la sensibilité, de la spécificité et l'indice de Youden du modèle.

#### 4.4.5. EEG comparée à la Baseline (N = 89)

Aucune variable n'est significative pour prédire la dangerosité de la reprise en prenant en compte Q4.

#### 4.4.6. Données brutes de l'OM (N = 50)

La variable ayant une association avec Q4 est rentrée dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Cette variable est : le diamètre moyen de la pupille ( $p = 0.034$ , ↗). L'âge ( $p = 0.22$ ) et le genre ( $p = 0.025$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu le genre (Exp(B) = 0.17,  $p = 0.027$ ) et le diamètre moyen de la pupille (Exp(B) = 1.14,  $p = 0.033$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 55) montrent 6 reprises en main sur les 15 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 31 reprises en main sur les 35 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	6	9	Spécificité = 0.4	Youden = 0.29
<i>Non-dangerosité observée</i>	4	31	Sensibilité = 0.89	

Tableau 55 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers le genre et l'OM brute, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.89 et indique que le modèle prédit très bien les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.40 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.29 reflète l'incapacité du modèle, à travers l'OM brute et Q4, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que le genre (AUC = 0.671) et le diamètre moyen de la pupille (AUC=0.684) sont au-dessus de la courbe de référence et pourraient prétendre à être candidats pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q4 (Figure 61).

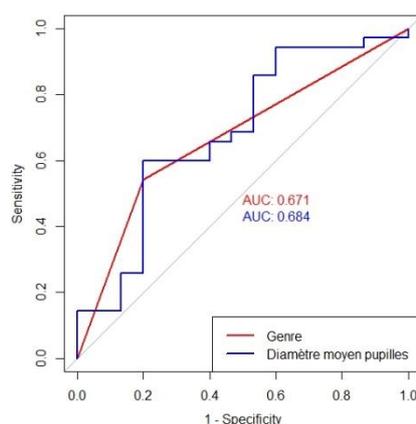


Figure 61 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de la OM brute retenues dans le modèle de prédiction de Q4.

#### 4.4.7. OM comparée à la Baseline (N = 50)

La variable ayant une association avec Q4 est rentrée dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Cette variable est : la dispersion moyenne des fixations ( $p=0.07$ ,  $\uparrow$ ). L'âge ( $p=0.22$ ) et le genre ( $p=0.025$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.97$ ,  $p = 0.1$ ) et le genre ( $\text{Exp}(B) = 0.16$ ,  $p = 0.020$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 56) montrent 5 reprises en main sur les 15 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 30 reprises en main sur les 35 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

	Dangerosité prédite	Non-dangerosité prédite	Performances	
Dangerosité observée	5	10	Spécificité = 0.33	Youden = 0.19
Non-dangerosité observée	5	30	Sensibilité = 0.86	

Tableau 56 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge et le genre, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.86 et indique que le modèle prédit très bien les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.33 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale

à 0.19 reflète l'incapacité du modèle, à travers l'OM comparée à la Baseline et Q4, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que le genre (AUC = 0.671) est au-dessus de la courbe de référence et pourrait prétendre à être candidat pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q4. L'âge (AUC = 0.629) longe la courbe de référence et montre que sa puissance de prédiction est faible (Figure 62).

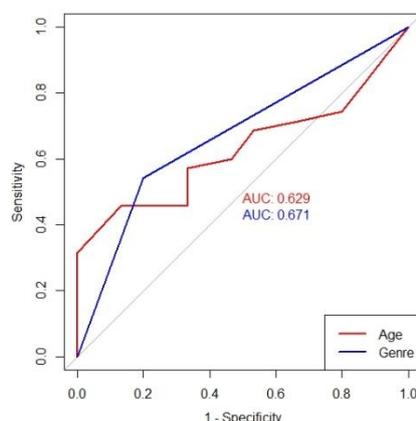


Figure 62 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de la OM comparée à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q4.

#### 4.4.8. Données brutes de l'OM, EEG et ECG (N = 40)

Les variables ayant une association avec Q4 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : LF/HF ( $p = 0.13$ ,  $\searrow$ ), Cz-Beta-Haut ( $p = 0.13$ ,  $\searrow$ ), Frontal Thêta/Beta ( $p = 0.14$ ,  $\searrow$ ), et le diamètre moyen de la pupille ( $p = 0.046$ ,  $\searrow$ ). L'âge ( $p = 0.32$ ) et le genre ( $p = 0.08$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu le genre (Exp(B) = 153.203,  $p = 0.026$ ), LFHF (Exp(B) = 0.001,  $p = 0.09$ ), Cz-Beta-Haut (Exp(B) = 1.18,  $p = 0.032$ ), Frontal Thêta/Beta (Exp(B) = 0.000,  $p = 0.025$ ) et le diamètre moyen de la pupille (Exp(B) = 0.79,  $p = 0.036$ ), pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 57) montrent 25 reprises en main sur les 28 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 7 reprises en main sur les 12 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

	Dangerosité prédite	Non-dangerosité prédite	Performances	
Dangerosité observée	25	3	Spécificité = 0.89	Youden = 0.47
Non-dangerosité observée	5	7	Sensibilité = 0.58	

Tableau 57 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers la l'âge et le genre, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.58 et indique qu'indique que la prédiction des reprises non-dangereuses est faible. Le score de spécificité, qui est égal à 0.89 indique que la prédiction des reprises en main « dangereuses » du modèle est très bonne. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui

est égale à 0.47, reflète le peu d'efficacité du modèle, à travers l'OM, EEG et ECG brutes et Q4, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.649) LH/HF (AUC = 0.649), Cz-Beta-Haut (AUC = 0.771), Frontal Thêta/Beta (AUC = 0.655), le diamètre moyen de la pupille (AUC = 0.696) sont au-dessus de la courbe de référence et pourrait prétendre à être candidat pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q4 (Figure 63).

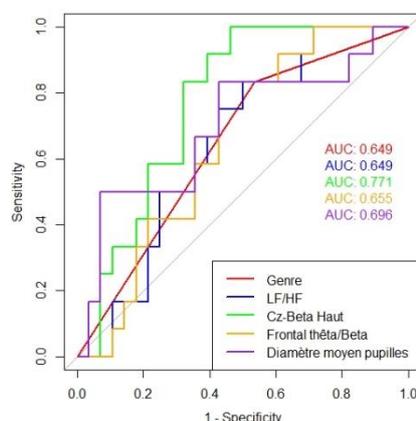


Figure 63 : Courbes ROC des variables de l'âge, du genre et de la OM, EEG et ECG brutes retenues dans le modèle de prédiction de Q4.

#### 4.4.9. Données de l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 40)

Les variables ayant une association avec Q4 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : La durée moyenne des fixations ( $p = 0.049$ ,  $\searrow$ ), la dispersion moyenne des fixations ( $p = 0.07$ ,  $\nearrow$ ), SD1 ( $p = 0.15$ ,  $\nearrow$ ) et Frontal-Thêta/Beta ( $p = 0.11$ ,  $\nearrow$ ). L'âge ( $p = 0.28$ ) et le genre ( $p = 0.047$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu la durée moyenne des fixations ( $\text{Exp}(B) = 0.97$ ,  $p = 0.16$ ) et la dispersion moyenne des fixations ( $\text{Exp}(B) = 0.97$ ,  $p = 0.031$ ), pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 58) montrent 1 reprises en main sur les 28 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 12 reprises en main sur les 12 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 1 et indique qu'indique que la prédiction des reprises non-dangereuses est parfaite. Le score de spécificité, qui est égal à 0.03 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.03 reflète l'incapacité du modèle, à travers l'OM, EEG et ECG comparée à la Baseline et Q4, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	Dangerosité prédite	Non-dangerosité prédite	Performances	
Dangerosité observée	1	27	Spécificité = 0.03	Youden = 0.03
Non-dangerosité observée	0	12	Sensibilité = 1	

Tableau 58 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers le genre, l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que l'âge (AUC = 0.536) et le genre (AUC = 0.591) longent la courbe de référence. La dispersion moyenne des fixations (AUC = 0.732) est au-dessus de la courbe de référence, et pourrait prétendre à être candidat pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q4 (Figure 64).

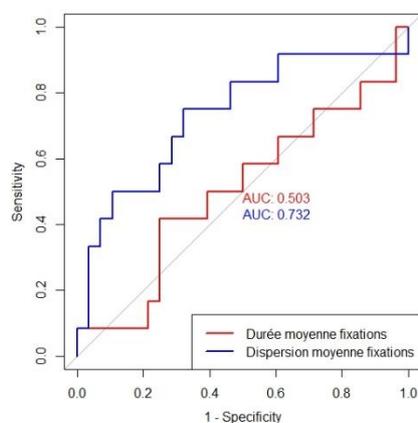


Figure 64 : Courbes ROC des variables du genre et de l'OM, EEG et ECG comparées à la Baseline retenues dans le modèle de prédiction de Q4.

#### 4.4.10. Données brutes de l'EEG et ECG (N = 87)

Les variables ayant une association avec Q4 sont rentrées dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Ces variables sont : SD1 ( $p = 0.09$ , ↗), LF/HF ( $p = 0.13$ , ↘) et Frontal Thêta/Beta ( $p = 0.016$ , ↗). L'âge ( $p = 0.08$ ) et le genre ( $p = 0.28$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu le genre (Exp(B) = 0.4,  $p = 0.15$ ), SD1 (Exp(B) = 1.04,  $p = 0.08$ ), LH/HF (Exp(B) = 6.85,  $p = 0.044$ ) et Frontal Thêta/beta (Exp(B) = 19015.33,  $p = 0.011$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 59) montrent 5 reprises en main sur les 20 observées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses, et 63 reprises en main sur les 67 considérées comme non-dangereuses sont correctement prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 0.94 et indique que le modèle prédit très bien les reprises de conduite non-dangereuses. Le score de spécificité, qui est égal à 0.25 indique que le modèle est incapable de prédire les reprises « dangereuses ». Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0.19 reflète l'incapacité du modèle, à travers l'EEG et ECG brutes et Q4, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	Dangerosité prédite	Non-dangerosité prédite	Performances	
Dangerosité observée	5	15	Spécificité = 0.25	Youden = 0.19
Non-dangerosité observée	4	63	Sensibilité = 0.94	

Tableau 59 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'EEG et ECG brutes en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

Les courbes ROC des variables retenues dans le modèle montrent graphiquement que le genre (AUC = 0.569) et SD1 (AUC = 0.546) et LF/HF (AUC = 0.622) longent la courbe de référence et indiquent un pouvoir de prédiction faible. Frontal Thêta/Beta (AUC = 0.675), est au-dessus de la courbe de référence et pourrait prétendre à être candidat pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q4 (Figure 65).

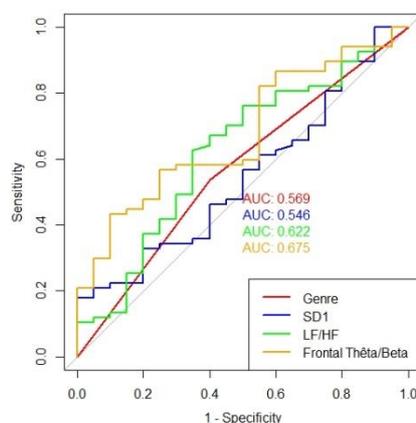


Figure 65 : Courbes ROC des variables du genre et de l'EEG et ECG brutes retenues dans le modèle de prédiction de Q4.

#### 4.4.11. EEG et ECG comparées à la Baseline (N = 87)

La variable ayant une association avec Q4 est rentrée dans le modèle de régression pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main. Cette variable est : TINN ( $p=0.08$ ,  $\nearrow$ ). L'âge ( $p=0.08$ ) et le genre ( $p=0.28$ ) ont été ajoutés pour ajuster le modèle.

Le modèle a retenu l'âge ( $\text{Exp}(B) = 0.97$ ,  $p=0.09$ ) pour tenter de prédire au mieux la dangerosité de la reprise.

Les résultats (Tableau 60) montrent toutes les reprises en main observées comme dangereuses sont prédites comme des reprises non-dangereuses et les reprises en main considérées comme non-dangereuses sont prédites comme non-dangereuses.

Le score de sensibilité du modèle est égal à 1 et indique que le modèle prédit parfaitement les reprises de conduite non-dangereuses. A l'inverse, le score de spécificité, qui est égal à 0 montre que le modèle est incapable de prédire les reprises de conduites dangereuses. Enfin, la valeur de l'indice de Youden, qui est égale à 0, reflète l'incapacité du modèle, à travers la OM et ECG comparées à la Baseline et Q4, à prédire la dangerosité de la reprise de conduite dans son ensemble.

	<i>Dangerosité prédite</i>	<i>Non-dangerosité prédite</i>	<i>Performances</i>	
<i>Dangerosité observée</i>	0	20	Spécificité = 0	Youden = 0
<i>Non-dangerosité observée</i>	0	67	Sensibilité = 1	

Tableau 60 : Matrice de prédiction des reprises de conduite non-dangereuses et dangereuses à travers l'âge, en prenant en compte Q4. Les indices de performances du modèle (spécificité, sensibilité et indice de Youden).

La courbe ROC de la variable retenue dans le modèle montre graphiquement que l'âge (AUC = 0.633), longe la courbe de référence. Son AUC montre que sa puissance de prédiction est faible (Figure 66) et n'est donc pas fiable pour prédire la dangerosité de la reprise dans le cas de Q4.

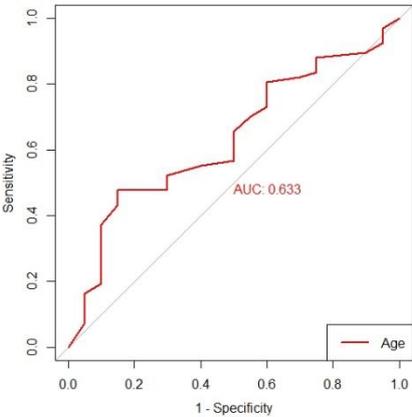


Figure 66: Courbes ROC des variables de l'âge retenues dans le modèle de prédiction de Q4.



## **CHAPITRE 4: DISCUSSION GENERALE**



# 1. Synthèse des résultats de l'analyse statistique

Dans le point précédent (Chapitre 3:4), beaucoup de modèles de prédiction de la dangerosité de la reprise de conduite ont été développés. Cependant, cela rend difficile la lecture des résultats. C'est pourquoi une sélection des modèles les plus prometteurs pour la prédiction de la dangerosité de la reprise en main de la conduite à travers les quatre qualifications de la reprise de conduite est effectué.

Dans un premier temps nous identifierons les variables de mesure du comportement général du conducteur les plus pertinentes, capables de qualifier la dangerosité de la reprise de conduite à travers les différentes qualifications. Puis, nous ferons une sélection des variables liées aux biomarqueurs (EEG, ECG, OM) les plus associées à la dangerosité de la reprise de conduite des données brutes et les données comparées à la Baseline. Le type de manœuvre sera également pris en compte (Changement de voie ou maintien dans la voie). Enfin, nous sélectionnerons les modèles de prédiction du temps de réponse et de la dangerosité de la reprise de conduite les plus performants dans les différentes qualifications de la conduite.

## 1.1. Les variables associées au temps de réponse (TOT)

Les variables comportementales reliées à la tâche non liée à la conduite (NDRT) se montrent associées au TOT. En effet, la nature de la NDRT modifie la durée du TOT (ANOVA,  $p = 0.000$ ). La NDRT « LECTURE » entraîne un TOT significativement plus long que pour « RADIO » (Bonferroni,  $p = 0.000$ ) et « VIDEO » (Bonferroni,  $p = 0.019$ ). L'implication des mains dans une tâche modifie également le temps de réponse. Lorsque le conducteur tient quelque chose dans ses mains (« MANGER », « LECTURE »), cela entraîne un temps de réponse plus long que lorsqu'il a les mains libres. Nous avons également constaté que plus le regard du conducteur s'éloigne de l'axe de la route, plus le temps de réponse pour une reprise en main est long. En effet, nous avons observé que la tâche « LECTURE » ou le regard est orienté généralement vers le sol, présente un TOT plus long que lorsque le conducteur a le regard orienté vers la tablette ou directement sur la route.

Lors des reprises de conduite nécessitant un changement de voie, plusieurs variables extraites des données brutes de la variabilité cardiaque (ECG) sont associées au temps de réponse (SDNN ( $p = 0.014$ ), TRI (0.008), SD2 ( $p = 0.007$ ), LF ( $p = 0.011$ )). Lorsque les données de l'ECG sont comparées à la Baseline, les résultats montrent une corrélation significative des variables MRRHRV ( $p = 0.010$ ), SDNN ( $p = 0.001$ ), RMSSD ( $p = 0.016$ ), TRI ( $p = 0.001$ ), SD1 ( $p = 0.016$ ), SD2 ( $p = 0.000$ ), LF ( $p = 0.020$ ) sur le TOT. Dans le cadre des reprises de conduite nécessitant un maintien dans la voie, la variable SD2 ( $p = 0.000$ ), extraite des données brutes de l'ECG, comparées à la Baseline, est associée au TOT.

A travers les données brutes de l'activité cérébrale (EEG), nous observons que des variations de Pz-Thêta ( $p = 0.049$ ), Pz-Beta-Haut ( $p = 0.023$ ), sont significativement associés à des variations du TOT. Pour les données brutes comparées à la Baseline, nous remarquons que Fz-Delta ( $p = 0.007$ ), Fz-Thêta ( $p = 0.008$ ), Fz-Beta-Bas ( $p = 0.019$ ), Fz-Gamma ( $p = 0.016$ ), Cz-Thêta ( $p = 0.043$ ), Cz-Gamma ( $p = 0.037$ ), Pz-Beta-Haut ( $p = 0.032$ ) sont associées aux variations du temps de réponse. Lors des reprises de conduite nécessitant un maintien dans la voie, Oz-Delta, extraite des données brutes de l'EEG est associée aux variations du TOT. Il en est de même pour Fz-Gamma ( $p = 0.034$ ), provenant des données brutes comparées à la Baseline.

Concernant l'activité oculomotrice, lors des reprises de conduite nécessitant un changement de voie et utilisant les données brutes, nous observons que les variations du diamètre de la pupille ( $p = 0.000$ ) (corrélation positive), et la distance moyenne des saccades ( $p = 0.008$ ) (corrélation négative) sont

associés à une variation du TOT. Pour les données brutes comparées à la Baseline, la durée moyenne des fixations ( $p = 0.035$ ), et la dispersion moyenne des fixations ( $p = 0.000$ ) sont associées aux variations du TOT. Lors des reprises de conduite nécessitant un maintien dans la voie et en prenant en compte les données brutes, le nombre de fixations ( $p = 0.040$ ), la fréquence des fixations ( $p = 0.039$ ) et le diamètre moyen de la pupille ( $p = 0.002$ ) (corrélation positive) sont significativement associée aux variations du TOT. Pour les données brutes comparées à la Baseline, la dispersion moyenne des fixations ( $p = 0.005$ ) est significativement associée au TOT.

## **1.2. Les modèles les plus performants pour la prédiction du TOT**

Les meilleurs modèles pour la prédiction du TOT en prenant en compte les différents paramètres physiologiques enregistrés sont :

La variabilité cardiaque permet à son meilleur niveau de prédire 9.5% de la variance du TOT et en ajoutant les variables relatives de la NDRT (nature de la NDRT plus l'implication des mains et la sollicitation du regard) ayant une association avec le TOT, nous sommes à 17%.

L'activité électroencéphalographique permet à son meilleur niveau de prédire 23.1 % de la variance du TOT et en ajoutant les variables relatives de la NDRT (nature de la NDRT et Implication des mains et sollicitation du regard et durée de la NDRT) ayant une association avec le TOT, nous sommes à 27.8%.

L'Eye-Tracking permet à son meilleur niveau de prédire 29.7 % de la variance du TOT et en ajoutant les variables relatives de la NDRT (nature de la NDRT et Implication des mains et sollicitation du regard) ayant une association avec le TOT, nous sommes à 33.2%.

## **1.3. Les variables associées à la dangerosité de la reprise**

L'âge est significativement associé à la dangerosité de la reprise pour les qualifications 2, 3 et 4. Les résultats montrent pour les trois qualifications, plus le sujet est âgé, plus la reprise en main de la conduite est dégradée.

L'évènement corrèle significativement avec la dangerosité de la reprise de conduite pour les qualifications 1, 2 et 3. L'évènement « TRAVAUX » génère le plus de reprises dangereuses, suivi par « OBSTACLE » et « ACCIDENT ».

La durée de la NDRT est significativement associée à la dangerosité de la reprise de conduite pour les qualifications 1 et 3. Le temps moyen de la NDRT est plus long lorsque la reprise de conduite est non-dangereuse que lorsque la reprise de conduite est ratée. La durée catégorisée est significativement associée à la reprise en qualifications, 1, 2, 3 et 4. Pour les quatre qualifications de la conduite, les NDRTs ayant une durée moyenne comprise entre 250 et 600 secondes génèrent le plus de reprises dangereuses.

Enfin, le TOT est significativement associé à la dangerosité de la reprise de conduite en qualification 1, 2 et 3. Nous constatons que plus le TOT est long, plus la reprise est dégradée.

L'ECG ressort uniquement à travers la qualification 2. En prenant en compte les données brutes, les variables PNN50, SD1/SD2 sont les variables les plus impactantes sur la dangerosité de la reprise. Et pour les données brutes comparées à la Baseline, ce sont MeanRR, FC et SD1/SD2.

L'EEG associé aux échecs de conduite en qualification 2 et 4. Pour la qualification 2, En prenant en compte les données brutes, les variables Fz-Delta, Cz-Delta, Cz-Beta-Bas, Cz-Beta-Haut, Cz-Gamma Frontal thêta et Frontal Beta sont les variables les plus significatives. Et pour les données brutes comparées à la Baseline, Fz-Delta et Frontal-Thêta sont les plus associées à la dangerosité de la reprise en qualification 2. Concernant la qualification 4, nous trouvons une seule variable impactant la reprise de conduite à travers les données brutes. Cette variable est Frontal Thêta/Beta.

L'Eye-Tracking à travers les données brutes, ressort à travers les qualifications 2 et 4 Pour la qualification 2, la durée moyenne des fixations est significative sur la dangerosité de la reprise. Enfin pour la qualification 4, Une corrélation positive entre le diamètre de la pupille et la dangerosité de la reprise de conduite est observée.

## **1.4. Les modèles les plus performants pour la prédiction de la dangerosité de la reprise de conduite**

Tous les modèles décrits ci-dessous sont ajustés en fonction de l'âge et du genre.

Pour effectuer la sélection des meilleurs modèles de prédiction de la dangerosité de la reprise, dans chacune des quatre qualifications, nous nous sommes basés sur l'indice de Youden des modèles, associant sensibilité et spécificité. Le modèle ayant le Youden le plus élevé dans chaque qualification, est sélectionné.

Pour la qualification 1, aucun des modèles de prédiction développés ne peut prédire la dangerosité de la reprise de conduite. Aucun des modèles n'est donc retenu.

Pour la qualification 2, le meilleur modèle se base sur les données brutes de l'ECG, EEG et OM (Chapitre 3:4.2.8). L'indice de Youden de ce modèle est de 0.51. Sa spécificité est de 0.9, ce qui signifie que 90% des reprises en main considérées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses. La sensibilité du modèle est à 0.61, ce qui veut dire que 61% des reprises non-dangereuses sont bien prédites comme des reprises non-dangereuses.

Concernant la qualification 3 le modèle ayant les meilleurs résultats de prédiction comprend les données brutes de l'Eye-Tracking (Chapitre 3:4.3.6) avec un indice de Youden à 0.33. Sa spécificité est de 0.55, ce qui signifie que 55% des reprises en main considérées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses. La sensibilité du modèle est à 0.78, ce qui veut dire que 78% des reprises non-dangereuses sont bien prédites comme des reprises non-dangereuses.

Enfin, pour la qualification 4, le meilleur modèle se base sur les données brutes de l'ECG, EEG et OM (Chapitre 3:4.4.8). L'indice de Youden de ce modèle est de 0.47. Sa spécificité est de 0.89, ce qui signifie que 89% des reprises en main considérées comme dangereuses sont correctement prédites comme dangereuses. La sensibilité du modèle est à 0.58, ce qui veut dire que 58% des reprises non-dangereuses sont bien prédites comme des reprises non-dangereuses.

## 2. Discussion

Grâce au développement de l'outil de simulation, des scénarii de conduite et la synchronisation des données développés dans le cadre de notre étude, nous avons pu obtenir des données de bonne qualité et exploitables. Nous avons donc pu reproduire certains résultats que l'on peut retrouver dans la littérature (Berghöfer et al., 2018; Zeeb et al., 2017). Notre étude a permis d'aboutir à des résultats intéressants dans le cadre de la prédiction de la dangerosité de la reprise de conduite.

### 2.1. Le temps de réponse (TOT)

Notre étude montre que le temps de réponse (TOT) moyen est de  $2.546 \pm 0.788$  s pour un budget temps de 8 secondes. Le TOT ne dépend ni de l'âge ni du genre. Les TOTs les plus longs sont observés lorsque le NDRT a une forte composante manuelle telle que la tenue d'un objet dans les mains ou qui implique une forte sollicitation de la position de la tête. Cependant, ni la durée du NDRT ni la nature de l'événement ne sont associées au TOT.

Dans le cas d'une reprise avec changement de voie, c'est essentiellement la durée du TOT qui détermine la dangerosité de la reprise : plus le TOT est long, plus la reprise sera mauvaise. L'âge du conducteur est également associé à la dangerosité de la reprise. Les conducteurs plus âgés ont eu une plus mauvaise prise de contrôle que les sujets plus jeunes. Les sujets plus âgés ont un contrôle latéral plus instable du véhicule (un écart type par rapport à la vitesse de rotation du volant) et une analyse moins bonne de la scène (vérification des rétroviseurs) que les sujets plus jeunes. En revanche, le contrôle longitudinal (TTC = comportement au freinage) ne dépendait pas de l'âge. De plus, les sujets plus âgés n'ont pas eu plus de collisions que les sujets plus jeunes.

Dans le cas d'une reprise sans changement de voie, l'âge expliquait principalement la dangerosité de la reprise : les sujets plus âgés ont fait moins bien que les sujets plus jeunes. Dans ce cas de reprise, la durée du TOT n'est pas associée à la dangerosité de la reprise.

La durée moyenne du TOT observée dans notre étude est légèrement plus courte  $2.546 \pm 0.788$ s mais très proche de celles précédemment calculées par les méta-analyses ( $2.72 \pm 1.45$ s (Zhang et al., 2019) et  $2.96 \pm 1.96$ s (Eriksson and Stanton, 2017)). La durée moyenne de TOT observée dans notre étude est légèrement plus longue que celle estimée par la formule de (McDonald et al., 2019) qui devrait être de 2.16 secondes pour un budget temporel de 8 secondes.

Nos résultats confirment les résultats de la méta-analyse de Zhang (Zhang et al., 2019) qui n'a pas trouvé de relation entre le TOT et l'âge. Nos résultats sont donc différents de la méta-analyse de Gold (Gold et al., 2017) et de l'étude Li. (Li et al., 2018) qui démontrent des TOT plus longs pour les sujets plus âgés, comme observé dans les études mesurant les temps de réaction à des tests cognitifs simples (Philip et al., 2004) ou complexes (Sagaspe et al., 2012). Körber (Körber et al., 2016) explique l'absence de relation entre TOT et âge par le fait que les conducteurs plus âgés sont plus prudents lorsqu'ils conduisent automatiquement (moins engagés dans le NDRT) et donc plus dans la boucle lors de la reprise de contrôle que les sujets plus jeunes. Les sujets plus âgés réagiraient aussi rapidement que les sujets plus jeunes lors d'une reprise de la conduite autonome. De plus, nos résultats confirment également les résultats de Berghöfer (Berghöfer et al., 2018) qui montrent que le genre n'est pas associé au TOT.

Notre étude confirme également les résultats d'études (Naujoks et al., 2019; Payre and Cestac, 2013; Zhang et al., 2019) qui montrent que la durée du TOT est plus longue lorsque le tâche non liée à la

conduite (NDRT) impose au conducteur de tenir quelque chose entre ses mains. Le TOT est sensiblement plus long car avant d'effectuer la manœuvre, le conducteur doit poser l'objet (siège passager ou sur ses genoux) afin de libérer ses mains pour effectuer la manœuvre. Nos résultats montrent que la sollicitation du regard des NDRT a également un impact sur le TOT et confirmerait les résultats d'autres études (Naujoks et al., 2019; Zhang et al., 2019). Les tâches non liées à la conduite automobile qui vont demander au conducteur de repositionner le regard du conducteur sur la scène de conduite, impliquant donc une forte composante oculomotrice avant la reprise, présentent un TOT plus long que les tâches non liées à la conduite sans composante oculomotrice importante. Nous avons démontré que c'est surtout l'orientation de la tête en fonction de la scène qui modifie les TOTs. Cette différence s'explique plus par l'orientation de la tête que par la direction du regard. En effet, lors de l'exécution des NDRT exigeant de regarder un film, ou des jeux vidéo sur une tablette fixée sur le tableau de bord, bien que le regard soit détourné de la route, l'orientation de la tête reste toujours dans l'axe de la route. Par contre, dans le cas de la lecture d'un livre, qui est le plus souvent placé sur les genoux du sujet, le regard ainsi que la position de la tête sont orientés vers les genoux. Ainsi, la lecture d'un livre est le NDRT qui est associé au TOT le plus long probablement parce qu'il nécessite de tenir le livre entre ses mains et une orientation de la tête hors de l'axe routier. Lors de la reprise, le conducteur doit laisser tomber le livre puis rediriger sa tête et son regard vers la route. Ces deux actions physiques étendent considérablement le TOT. L'effet de la charge cognitive ne semble pas avoir d'impact sur le TOT comme observé par Zeeb (Zeeb et al., 2017).

Il est intéressant de noter que la nature de l'événement et son impact sur la manœuvre (changement de voie ou maintien dans la voie) ne sont pas associés au TOT. Il apparaît donc que le temps de réponse dépend principalement de l'alerte (TOR) et de la mise en place des processus physiques et visuels de reprise en main. Les processus cognitifs (évaluation et sélection de l'action) pourraient se faire après l'appui du bouton permettant la reprise en main.

Nous n'avons trouvé aucun effet de la durée du NDRT sur le TOT, contrairement aux travaux de (Bourrelly et al., 2019) qui ont observé que le TOT était plus long chez les conducteurs ayant visionné un film pendant une heure avant le TOR que chez les conducteurs ayant visionné un film 10 minutes avant le TOR. Les auteurs expliquent que cette différence est davantage liée à l'apparition de somnolence due à la monotonie et à la faible charge cognitive du NDRT (visionnage de films). Quoiqu'il en soit, dans notre étude, la durée maximale du NDRT était de 23 minutes, ce qui n'était peut-être pas assez long et monotone pour avoir un effet.

Ni les variables physiologiques (ECG, EEG, diamètre de la pupille), ni les variables comportementales (Eye-Tracking) n'ont été identifiées comme variables prédictives. Il apparaît donc que ces variables analysées ne permettent pas de prédire le Temps de réponse.

En conclusion, ni l'âge ni le genre ni les paramètres physiologiques et comportementaux étudiés au cours de ce travail ne permettent de prédire le temps de réponse. Seule la nature de la NDRT et la position de la tête avant la reprise permettent de prédire le TOT. Paradoxalement, ces deux paramètres n'interviennent pas dans les modèles de prédiction de la dangerosité de la reprise.

## **2.2. La dangerosité de la reprise**

Comme nous l'avons vu, la plupart des travaux portant sur la reprise de la conduite s'intéresse essentiellement à la performance de la conduite : TOT (temps que le conducteur met pour poser les mains sur le volant, temps à se désengager de la conduite, temps que met le conducteur à rediriger le regard sur la route). Cependant, Louw et son équipe (Louw et al., 2017) considèrent que le TOT n'est pas l'indicateur le plus approprié pour prédire les processus de reprise en main. Ainsi, pour certains

auteurs, la dangerosité de la reprise doit prendre en compte l'accélération longitudinale et latérale du véhicule avec quelque fois la prise en compte de la vérification de la possibilité de changer de voie (contrôle des rétroviseurs). Les auteurs estiment qu'au-delà d'un certain seuil, la reprise n'est plus considérée comme une manœuvre sécurisée. L'équipe de l'université de Leeds a proposé de qualifier la reprise en prenant l'inverse du TTC et les mesures permettant d'identifier une manœuvre (position de la pédale de frein, angle du volant). Li (Li et al., 2018) a introduit la notion de collision dans l'estimation de la dangerosité de la reprise. Pour ces auteurs (Li et al., 2018), une collision comprend un accident, ou une sortie de route. Effectivement, des manœuvres présentant des seuils d'accélération latérales et longitudinales normaux peuvent tout de même conduire à une collision. Comme suggéré par Li (Li et al., 2018), dans le cadre de ce travail, nous avons inclus la collision dans tous les critères permettant de qualifier la reprise. Lors d'une reprise nécessitant un changement de voie, le time to collision (TTC, permettant de mesurer l'accélération longitudinale (ou freinage) est pris en compte. Dans certains cas, le TTC est associé à une mesure de l'accélération latérale (Vitesse de rotation du volant) ou un contrôle de sécurité avant manœuvre de changement de voie (contrôle des rétroviseurs) Dans le cas d'une reprise en main, nécessitant un maintien dans la voie, comme Mole (Mole et al., 2020) le suggérait, l'ILC est associé à la présence d'une collision ou non. Le choix de nos critères de qualification sont discutables dans le cadre des modèles de comportement du conducteur lors d'une reprise de conduite. De plus, le seuil que nous avons fixé pour une mauvaise vitesse de rotation du volant a été calculé sur nos données (4<sup>e</sup> quartile). Ce seuil pourrait être calculé sur des données de conduite plus importantes.

### **2.2.1. Dangerosité de la reprise lors d'un changement de voie imposé**

Nos travaux démontrent et confirment que dans le cas d'une reprise nécessitant un changement de voie, la dangerosité de la reprise dépend principalement du TOT: plus le TOT est élevé, plus la reprise est mauvaise (Ma et al., 2020). Ainsi, plus une période de transition entre le passage de la conduite autonome à la conduite manuelle est longue, plus le temps à la mise en place de processus cognitifs et visuels qui permettent d'effectuer la manœuvre en toute sécurité est réduit, conduisant à une mauvaise dangerosité de la reprise de conduite. Comme l'ont bien démontré de nombreuses études (Eriksson and Stanton, 2017). Le TOT est un bon marqueur des performances de reprise en main et de la dangerosité de la reprise en main.

L'âge est associé à la dangerosité de la reprise uniquement si elle prend en compte l'accélération latérale ou les contrôles de sécurité. En effet, en cas de reprise, qualifiée par le TTC (contrôle longitudinal) et de présence ou non de collision (Impact avec un élément ou sortie de voie), nos résultats montrent qu'il n'y a pas de lien entre l'âge des participants et la dangerosité de la reprise. En revanche, lorsque la dangerosité de la reprise est estimée en fonction du TTC, de la vitesse de rotation du volant et de la présence ou non d'une collision (qualification 2) ou en fonction du TTC, la vérification ou non des rétroviseurs et la présence de collision ou non (qualification 3), l'âge modifie la dangerosité de la reprise : les conducteurs plus âgés réussissent moins bien que les sujets plus jeunes. Une mauvaise performance de prise de contrôle des sujets plus âgés serait liée à une plus grande déviation de la vitesse de rotation du volant confirmant certains travaux (Li et al., 2019, 2018) et à une mauvaise analyse de la scène en particulier ce qui se passe derrière le véhicule (rétroviseurs vérification). Il apparaît donc que contrairement aux sujets jeunes, les sujets âgés, présenteraient un moins bon contrôle de l'accélération latérale et n'effectueraient pas les contrôles de sécurité lors d'un changement de voie. Cependant, nos travaux démontrent que l'âge n'est pas associé au TTC et la présence de collision, contrairement à certains travaux (Li et al., 2019, 2018). Ainsi, le comportement de freinage ou le contrôle longitudinal ne dépendraient pas de l'âge.

Le genre, la nature de la NDRT et la position de la tête liée à la NDRT n'ont aucun impact sur la dangerosité de la reprise. Cependant, la durée de la NDRT, pourrait avoir un impact sur la dangerosité de la reprise. Le temps moyen des NDRT conduisant à des reprises considérées comme dangereuses était plus court que celui des NDRT conduisant à une prise de contrôle non-dangereuse. Lorsque nous regardons les durées des NDRT, nous constatons que, le taux de dangerosité le plus élevé est observé lorsque la NDRT est d'une durée moyenne (entre 250 et 600 secondes). Les tâches distractives de longues ou courtes durées présentent des taux de dangerosité plus faibles. Ces résultats sont discutables mais pourraient s'expliquer par une perte d'intérêt de la part du conducteur à effectuer la NDRT trop longue et donc s'intéresser à la scène de conduite. Pour la dangerosité de la reprise dans le cadre d'un maintien dans la voie, nous observons les mêmes résultats. Nos résultats confirment l'étude de (Feldhutter et al., 2017) qui montre que la durée de la conduite autonome avec activité visuelle / manuelle (SuRT: SUrrogate Reference Task) n'a pas d'impact sur les performances de reprise en main. Paradoxalement, la nature de la NDRT, l'implication des mains et la sollicitation du regard ont un impact sur le TOT mais ces variables ne sont pas associées à la dangerosité de la reprise. La nature de la NDRT (cognitive, oculomoteur, neutre), les processus permettant la mise en œuvre de la manœuvre ne sont pas modifiés par la nature de la NDRT (charge cognitive, charge oculomotrice, charge motrice)

Pour les reprises avec changement de voie, quels que soient les paramètres de qualification, la nature de l'évènement à l'origine d'un TOR n'est pas associée à la dangerosité de la reprise. Nos résultats démontrent que l'évènement « TRAVAUX » est celui qui provoque le plus de reprises en main dangereuses et, la présence d'un accident sur la voie de circulation en génère le moins. Dans nos scénarii, les zones de travaux, correspondent à une demande de changement de voie progressive, balisée par des cônes de signalisation. Ainsi, le conducteur est guidé progressivement pour effectuer son changement de voie. Il est fort probable que le taux élevé de reprises dangereuses soit dû à cet accompagnement progressif qui peut biaiser le caractère dangereux de l'évènement, et donc modifier le contrôle longitudinal du véhicule par le conducteur en réduisant le TTC. Cela peut s'expliquer par la perception qu'a le participant sur la gravité d'une éventuelle collision avec l'évènement. Ainsi, plus l'évènement qui déclenche la demande de reprise en main de la conduite est considérée comme à risque par le conducteur, meilleure est sa reprise en main. (Louw et al., 2017) avaient déjà observé que plus un évènement arrivant devant eux est dangereux, plus les conducteurs vont mettre en œuvre une manœuvre d'évitement.

Dans le cadre de la qualification 1 (prise en compte du contrôle longitudinal et de la présence de collision), aucune variable électrocardiographique, électroencéphalographique et oculomotrice ne permet de prédire la dangerosité de cette reprise en main. Ces résultats suggèrent que les paramètres physiologiques et biologiques que nous avons étudiés ne permettent pas de prédire le comportement de freinage des conducteurs.

Dans le cadre de la qualification 2 (prise en compte du contrôle longitudinal, contrôle latéral et présence de collision), une variable de l'activité encéphalographie, la bande Thêta en position frontale et deux variables oculomoteurs, la durée moyenne des fixations et le diamètre moyen de la pupille permettent de prédire la dangerosité de la reprise. Comme nous l'avons vu, ces paramètres biologiques renseignent les niveaux attentionnel, cognitif et émotionnel des conducteurs avant la reprise. Ces trois paramètres permettraient de prédire les processus cognitifs (choix de l'action) et le processus physique (changement de direction) mis en œuvre dans le processus de reprise en main.

Dans le cadre de la qualification 3, (prise en compte du contrôle longitudinal, contrôle de sécurité et présence de collision), seules trois variables de l'activité oculomotrice prédisent la dangerosité de la reprise : la fréquence des fixations, la durée moyenne des fixations et la distance moyenne des saccades. Comme nous l'avons vu précédemment, certaines études ont bien démontré que ces

paramètres oculomoteurs renseignent les niveaux cognitif et attentionnel des conducteurs. Il apparaît donc que ces paramètres oculomoteurs permettraient de prédire les processus visuels mis en œuvre dans le processus de reprise en main.

Nos résultats suggèrent que le comportement de freinage (contrôle longitudinale) ne peut être prédit par les variables physiologiques et comportementales que nous avons étudiées. Si les modèles de prédiction de la qualification de la reprise prennent en compte le contrôle latéral, l'analyse de la bande thêta de l'EEG en position frontale, le diamètre pupillaire et la durée moyenne des fixations doivent être inclus dans le modèle. Si les modèles prennent en compte les contrôles de sécurité (la fréquence des fixations, la durée moyenne des fixations et la distance moyenne des saccades), les variables doivent être incluses dans le modèle.

### **2.2.2. Dangersité de la reprise sans changement de voie imposé**

Dans le cas d'une reprise ne nécessitant pas de changement de voie, nous avons démontré d'une part que le TOT ne conditionne pas la dangersité de la reprise et d'autre part que la dangersité de la reprise dépend principalement de l'âge du conducteur : les conducteurs plus âgés réussissent moins bien la reprise que les jeunes conducteurs. Confrontés à ce type de situation, les sujets plus âgés ne sont pas en mesure de maintenir le véhicule dans la voie en raison de plus de mouvements du volant induisant des ILC.

Le ratio LFHF, la bande Beta Haut en Cz, le rapport Thêta/Beta en frontal et le diamètre de la pupille permettent de prédire la dangersité de la reprise. Comme vu précédemment, ces paramètres biologiques renseignent le niveau attentionnel émotionnel des conducteurs avant la reprise ne nécessitant pas de changement de voie. Dans notre étude, les reprises ne nécessitant pas de changement de voie s'appuient sur une simulation d'absence de marquage au sol ou d'une forte pluie réduisant considérablement le champ visuel du conducteur. Il apparaît donc que ces deux situations ne sont pas homogènes en matière de quantité d'information visuelle disponible par le conducteur. Louw et son équipe (Louw et al., 2017) ont montré que la quantité d'informations visuelles disponibles a un impact sur la rapidité avec laquelle les conducteurs reprennent le contrôle manuel de la conduite. Cette récente observation doit être prise en compte dans les futurs modèles de prédiction.

### 3. Limites

Notre travail présente un certain nombre de limites.

Premièrement, notre travail a porté sur des reprises de conduite effectuées en conduite simulée. Les comportements des conducteurs en conduite simulée sont différents de ceux observés en conduite réelle (Davenne et al., 2012). Même si un grand nombre de travaux a étudié une reprise de conduite en simulateur, les résultats observés en simulation sont peut-être différents de ceux observés lors d'une reprise de conduite en conduite réelle.

Dans l'élaboration des scénarios de conduite, nous n'avons contrôlé la densité du trafic et dans la plupart des cas, lors des manœuvres, le conducteur n'était pas en conflit avec d'autres véhicules. La répétition des reprises de conduite dans des conditions très sécurisantes a peut-être modifié les comportements de conduite des conducteurs, en particulier dans les contrôles de sécurité. Les prochaines études devront effectuer des reprises de conduite avec les densités du trafic plus ou moins importantes.

Il est fort possible qu'il y ait un effet d'ordre des scénarii notamment au niveau de la présentation des événements. Dans les deux scénarii développés, les événements présentés et amenant le conducteur à prendre le contrôle manuel sont identiques. Bien que l'ordre de présentation soit différent, dans le second scénario, le participant connaissait déjà les événements et cette connaissance pourrait affecter la confiance du conducteur lors de la prise en charge de la conduite. Il pourrait y avoir un effet d'apprentissage dans les événements déjà traités. L'événement « METEO » engagé dans les deux scénarios est représenté par l'apparition d'une pluie graduelle et commence avant le TOR. Les participants voient et entendent la pluie avant que le TOR avertisse d'une situation anormale, cela pourrait donner des indices comme possible TOR du véhicule. Un effet d'anticipation pourrait avoir lieu. Nous nous interrogeons également sur l'impact de la durée du NDRT sur la dangerosité de la reprise. Cela souligne l'une des limites de notre étude, car nous n'avons pas mesuré le niveau d'engagement des conducteurs ou de somnolence dans le NDRT.

Il est également tout à fait possible qu'il y ait un effet de sensibilité du système de direction du véhicule sur plusieurs points. Certains sujets plus âgés se sont plaints de la sensibilité du volant. Nous avons constaté que les personnes âgées de 61 à 75 ans avaient plus de difficultés à garder le véhicule droit que les autres groupes d'âge. Cette mauvaise gestion du volant peut modifier les valeurs que nous avons pris dans nos critères de qualification de conduite, en particulier, la vitesse de rotation du volant. Malgré les avantages de la contrôlabilité, la simulation de conduite peut également avoir un effet négatif sur l'assiduité et l'engagement des conducteurs. Il est possible que certains participants n'aient pas abordé la conduite simulée avec autant de rigueur qu'en situation de conduite réelle. Comme le danger réel n'était pas présent pour le participant en cas d'accident, la conduite sur simulateur pourrait être assimilée à un jeu vidéo à grande échelle qui aurait pu conduire à des comportements qui ne reflétaient pas la conduite réelle des participants (ex : vitesse excessive ou absence de vérification des miroirs) et les résultats réels du TOT et de la dangerosité de la reprise.

Nous avons observé une corrélation négative entre le TOT et le TTC montrant que les participants ne freinent pas à l'approche d'un obstacle et ne contrôlent donc en aucun cas la composante longitudinale. Il est évident qu'un effet de simulation émerge. Une vérification de ce comportement de non-freinage dans le contexte d'une reprise en main nécessitant un changement de voie doit être réalisé en conduite réelle afin de vérifier ce possible effet « simulation ».

Comme nous l'avons vu précédemment, (Chapitre 2:6.4.3), la mastication durant la tâche non liée à la conduite « MANGER » a été retranscrite sur les signaux enregistrés de l'EEG en laissant apparaître énormément d'artefact. Toutes les reprises en main incluant « MANGER » ont été exclues des analyses et concernent tout de même 16.7% de la totalité des reprises.

Une autre limite concerne les données enregistrées de l'Eye-Tracking. Effectivement, seulement 15 sujets sur les 32 inclus dans l'étude ANTIDOTE ont subi un enregistrement oculomoteur par le système Pupil Core. Cela est dû à un changement de système d'Eye-Tracking durant l'expérimentation. Au lancement de l'étude ANTIDOTE, un système Facelab était utilisé. C'est un système d'enregistrement oculaire avec deux caméras d'acquisition fixés sur le tableau de bord du véhicule. Ce système fonctionne très bien en conduite manuelle ou le conducteur a le regard majoritairement dirigé dans l'axe de conduite. Dans notre cas, c'est-à-dire dans le cadre d'une conduite automatisée de niveau 3, le conducteur ne conduit pas et en fonction de la tâche qu'il réalise, son regard et la position générale de son buste ne permettent pas au système Facelab une acquisition convenable de données oculomotrices.

Enfin, dans le cadre des modèles de prédiction du comportement du conducteur en conduite manuelle, certains modèles prennent en compte également la composante émotionnelle, psychologique, ses compétences et le style de conduite du conducteur. L'introduction de ces variables dans nos modèles pourront améliorer encore la prédiction.

## **CHAPITRE 5: CONCLUSION**



L'émergence des véhicules autonomes de niveau 3 est liée à la problématique de sécurité en matière de limite de ces systèmes. Alors que l'automatisation permet effectivement d'éviter des erreurs de conduite de la part du conducteur, la permission d'effectuer des tâches non liées à la conduite interroge sur la capacité du conducteur à reprendre le volant en cas d'évènement non géré par le système de conduite autonome.

Nous avons recherché la possibilité d'expliquer et de prédire la dangerosité de la reprise de conduite manuelle et le temps de réponse du conducteur en prenant en compte l'activité physiologique et comportementale du conducteur et la tâche non liée à la conduite réalisée par le conducteur avant l'alerte (TOR) de reprise en main par le système.

Pour répondre à ces hypothèses, nous avons en premier lieu développé une méthode d'analyse de conduite permettant d'appréhender le comportement du conducteur dans le cadre d'une demande de reprise en main de la conduite automatisée. Nous avons particulièrement travaillé sur l'outil de simulation et son environnement dans le cadre du mal du simulateur afin de réduire au maximum les effets négatifs de la simulation de conduite sur le conducteur. Ces modifications ont permis à tous les conducteurs inclus dans l'étude, d'effectuer en totalité et sans symptômes, les 1h40 de conduite simulée. En nous basant sur les travaux de la littérature (Gold et al., 2016; Körber et al., 2015; Naujoks et al., 2014; Zeeb Kathrin et al., 2016), nous avons développé des scénarii de conduite permettant de recréer des situations de reprise en main du véhicule associées à la réalisation de tâches non liées à la conduite automobile. Nos résultats sur les performances de conduite sont identiques à ceux observés dans des travaux provenant de la littérature (Berghöfer et al., 2018; Payre and Cestac, 2013; Zeeb et al., 2017; Zhang et al., 2019).

Dans un deuxième temps, afin de mesurer l'état physiologique et comportementale du conducteur durant la conduite, nous avons utilisé des systèmes permettant d'acquérir des données électrocardiologiques, électroencéphalographiques et oculomotrices jugées pertinentes pour l'analyse du comportement. Pour obtenir un signal électroencéphalographique de bonne qualité dans une situation de conduite automobile, nous avons utilisé un casque EEG s'appuyant sur une technologie d'électrodes actives humides. Des données EEG analysables ont été obtenues dans la plupart des cas, sauf lorsque les sujets devaient manger durant la tâche non liée à la conduite automobile (NDRT). Nous nous sommes également attachés à mettre en place un système permettant la synchronisation des enregistreurs électrocardiographique, électroencéphalographique, oculomoteur et les données de performances de conduite.

Des routines informatiques développées en python nous ont permis d'extraire automatiquement toutes les données nécessaires à la prédiction des performances et à celle de la dangerosité de la reprise de conduite. L'ensemble de cette méthodologie pourra être utilisé pour d'autres études portant sur la conduite autonome mais également la conduite manuelle.

Une fois ces étapes accomplies, nous nous sommes intéressés à la dangerosité de la reprise en main de la conduite en élaborant de nouvelles qualifications de contexte de conduite. L'élaboration de ces qualifications nous a ainsi permis de mettre en évidence certains paramètres physiologiques prédisant la dangerosité de la reprise.

A notre connaissance, nos résultats, et ceux de l'équipe Du (Du et al., 2020a, 2020b) sont les premiers à tenter de prédire la dangerosité de la reprise en discriminant les reprises non-dangereuses et reprises dangereuses.

Ces résultats ont mené à la soumission à « Accident Analysis and Prevention » d'un premier article qui démontre l'association de la tâche non liée à la conduite, du type de conduite, de l'âge et du genre du

conducteur avec le temps de réponse et la dangerosité de la reprise de conduite lors d'une conduite automatisée de niveau 3. Deux autres articles sont en cours de rédaction. Le premier portera sur l'échange de nos données et la description de l'acquisition et le traitement des données (soumission prévue à « Scientific Data »). Enfin, le dernier article décrira les différents modèles qui permettront de prédire la dangerosité de la reprise en prenant en compte la tâche non liée à la conduite, du type de conduite, l'âge et le genre du conducteur et les paramètres physiologiques et comportementaux enregistrés (activité électroencéphalographique, électrocardiographique et oculomotrice).

Nos résultats devraient permettre dans le futur d'améliorer les différents modèles existants (comportement au freinage, comportement de d'évitement et comportement de freinage + évitement) capables d'expliquer le comportement d'un conducteur lors de la reprise en main de la conduite automatisée. Pour ce faire, des recherches supplémentaires seront à réaliser, pour confirmer nos résultats et les étendre à de nouveaux champs expérimentaux (conduite réelle – autres populations de conducteurs).

Lors de futurs travaux, d'autres pistes pourraient être explorées sur la prédiction de la dangerosité de la reprise intégrant d'autres critères de qualification comme la composante du freinage (action du frein, force de freinage).

Nos travaux ont ouvert la porte à de nouvelles méthodes d'analyses qui permettront de rendre plus sûre la conduite autonome.

## BIBLIOGRAPHIE

- Albright, J., Bell, A., Schneider, J., Nyce, C., 2015. Automobile insurance in the era of autonomous vehicles Marketplace of change : A message from the insurance task force. KPMG October .
- Almahasneh, H., Chooi, W.T., Kamel, N., Malik, A.S., 2014. Deep in thought while driving: An EEG study on drivers' cognitive distraction. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 26, 218–226. doi:10.1016/j.trf.2014.08.001
- Alrefaie, M.T., Summerskill, S., Jackon, T.W., 2019. In a heart beat: Using driver's physiological changes to determine the quality of a takeover in highly automated vehicles. *Accid. Anal. Prev.* 131, 180–190. doi:10.1016/j.aap.2019.06.011
- Awais, M., Badruddin, N., Drieberg, M., 2017. A hybrid approach to detect driver drowsiness utilizing physiological signals to improve system performance and Wearability. *Sensors (Switzerland)* 17 9, 1–16. doi:10.3390/s17091991
- Baldwin, C.L., Roberts, D.M., Barragan, D., Lee, J.D., Lerner, N., Higgins, J.S., 2017. Detecting and Quantifying Mind Wandering during Simulated Driving. *Front. Hum. Neurosci.* 11, 406. doi:10.3389/fnhum.2017.00406
- Balle, M., Bornas, X., Tortella-Feliu, M., Llabrés, J., Morillas-Romero, A., Aguayo-Siquier, B., Gelabert, J.M., 2013. Resting parietal EEG asymmetry and cardiac vagal tone predict attentional control. *Biol. Psychol.* 93 2, 257–261. doi:10.1016/j.biopsycho.2013.02.012
- Bazilinsky, P., de Winter, J.C.F., 2017. Analyzing crowdsourced ratings of speech-based take-over requests for automated driving. *Appl. Ergon.* 64, 56–64. doi:10.1016/j.apergo.2017.05.001
- Beatty, J., 1982. Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychol. Bull.* 91 2, 276–292. doi:10.1037/0033-2909.91.2.276
- Berghöfer, F.L., Purucker, C., Naujoks, F., Marberger, C., 2018. Prediction of take-over time demand in conditionally automated driving - results of a real world driving study. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Eur. Chapter 2018*, 69–81. doi:https://www.hfes-europe.org/wp-content/uploads/2018/10/Purucker2018.pdf
- Borojeni, S.S., Wallbaum, T., Heuten, W., Boll, S., 2016. Comparing Shape-Changing and Vibro-Tactile Steering Wheels for Take-Over Requests in Highly Automated Driving, in: *AutomotiveUI '17: ACM 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications Oldenburg Germany*. pp. 221–225. doi:10.1145/3122986.3123003
- Bouchard, S., Renaud, P., Robillard, G., 2007. Revising the factor structure of the simulator sickness questionnaire. *Acte Colloq. du Annu. Rev. CyberTherapy Telemedicin* 5, 117–122.
- Bourrelly, A., Naurois, C.J. De, Zran, A., Rampillon, F., Vercher, J., Bourrelly, A., Naurois, C.J. De, Zran, A., Rampillon, F., Vercher, J., 2019. Long automated driving phase affects take-over performance To cite this version : HAL Id : hal-02122990.
- Bueno, M., Dogan, E., Selem, F.H., Monacelli, E., Boverie, S., Guillaume, A., 2016. How different mental workload levels affect the take-over control after automated driving. *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC June 2019*, 2040–2045. doi:10.1109/ITSC.2016.7795886
- Carsten, O., Lai, F.C.H., Barnard, Y., Jamson, A.H., 2012. Control Task Substitution in Semiautomated Driving : Does It Matter What Aspects Are Automated ? *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 54 5, 747–761. doi:10.1177/0018720812460246
- Casner, S.M., Hutchins, E.L., Norman, D., 2016. The Challenges of Partially Automated Driving. *mmun*

ACM 59 5 , 70–77. doi:10.1145/2830565

- Cavanagh, J.F., Frank, M.J., 2014. Frontal theta as a mechanism for cognitive control. *Trends Cogn. Sci.* 18 8 , 414–421. doi:10.1016/j.tics.2014.04.012
- Chang, Y.C., Huang, S.L., 2012. The influence of attention levels on psychophysiological responses. *Int. J. Psychophysiol.* 86 1 , 39–47. doi:10.1016/j.ijpsycho.2012.09.001
- Clark, H., Feng, J., 2017. Age differences in the takeover of vehicle control and engagement in non-driving-related activities in simulated driving with conditional automation. *Accid. Anal. Prev.* 106, 468–479. doi:10.1016/j.aap.2016.08.027
- Clark, H., Mclaughlin, A.C., Williams, B., Feng, J., 2017. Performance in Takeover and Characteristics of Non-driving Related Tasks during Highly Automated Driving in Younger and Older Drivers. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 61 1 , 37–41. doi:10.1177/1541931213601504
- Cowley, B., Filetti, M., Lukander, K., Torniainen, J., Henelius, A., Ahonen, L., Barral, O., Kosunen, I., Valtonen, T., Huottilainen, M., Ravaja, N., Jacucci, G., 2016. The psychophysiology primer: A guide to methods and a broad review with a focus on human-computer interaction. *Found. Trends Human-Computer Interact.* 9 3–4 , 151–308. doi:10.1561/11000000065
- Craig, A., Tran, Y., Wijesuriya, N., Nguyen, H., 2012. Regional brain wave activity changes associated with fatigue. *Psychophysiology* 49 4 , 574–582. doi:10.1111/j.1469-8986.2011.01329.x
- Davenne, D., Lericollais, R., Sagaspe, P., Taillard, J., Gauthier, A., Espié, S., Philip, P., 2012. Reliability of simulator driving tool for evaluation of sleepiness, fatigue and driving performance. *Accid. Anal. Prev.* 45, 677–682. doi:10.1016/j.aap.2011.09.046
- Delacour, H., Servonnet, A., Perrot, A., Vigezzi, J.F., Ramirez, J.M., 2005. La courbe ROC ( receiver operating characteristic ) : principes et principales applications en biologie clinique. *Ann. Biol. Clin. (Paris).* 63 2 , 145–154.
- Delorme, A., Makeig, S., 2004. EEGLAB : an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *J. Neurosci. Methods* 134, 9–21. doi:10.1016/j.jneumeth.2003.10.009
- Derogatis, L.R., 1986. SCL 90 R Administration, Scoring and Procedures Manual II for the Revised Version and Other Instruments of the Psychopathology Rating Scale Series.
- Dogan, E., Rahal, M., Deborne, R., Delhomme, P., Kemeny, A., Perrin, J., 2017. Transition of control in a partially automated vehicle : Effects of anticipation and non-driving-related task involvement. *Transp. Res. Part F Psychol. Behav.* 46, 205–215. doi:10.1016/j.trf.2017.01.012
- Dovgan, E., 2017. Multiobjective discovery of driving strategies using the SCANer Studio. *Dep. Intell. Syst.*
- Du Lac, N., Delaunay, C., Michel, G., 2008. RT Maps “Real Time, Multisensor, Advanced Prototyping Software,” in: 3rd National Conference on “Control Architectures of Robots.”
- Du, N., Tilbury, D.M., Robert, L.P., Zhou, F., Pradhan, A.K., Pulver, E., Yang, X.J., 2020a. Predicting Takeover Performance in Conditionally Automated Driving, in: CHI EA '20: Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. pp. 1–8. doi:https://dx.doi.org/10.1145/3334480.3382963
- Du, N., Zhou, F., Pulver, E.M., Mechanical, D.M.T., Robert, L.P., Pradhan, A.K., Industrial, X.J.Y., 2020b. Predicting Driver Takeover Performance in Conditionally Automated Driving. *Accid. Anal. Prev.* 148 August . doi:https://doi.org/10.1016/j.aap.2020.105748

- Ehinger, B. V., Groß, K., Ibs, I., König, P., 2019. A new comprehensive eye-tracking test battery concurrently evaluating the Pupil Labs glasses and the EyeLink 1000. *PeerJ* 2019 7 , 1–43. doi:10.7717/peerj.7086
- Eriksson, A., Petermeijer, S.M., Zimmermann, M., Winter, J.C.F. De, Bengler, K.J., Stanton, N.A., 2019. Rolling Out the Red ( and Green ) Carpet : Supporting Driver Decision Making in Automation-to-Manual Transitions. *IEEE Trans. Human-Machine Syst.* 49 1 , 20–31. doi:10.1109/THMS.2018.2883862
- Eriksson, A., Stanton, N.A., 2017. Take-over time in highly automated vehicles: non-critical transitions to and from manual control. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 59 4 , 689–705. doi:10.1177/0018720816685832
- Feldhutter, A., Gold, C., Schneider, S., Bengler, K., 2017. How the Duration of Automated Driving Influences Take-Over Performance and Gaze Behavior. *Adv. Ergon. Des. Syst. Prod. Process.* 309–318. doi:10.1007/978-3-662-53305-5
- Fize, D., 2006. Bases cérébrales de la catégorisation visuelle rapide -Etudes chronométriques et fonctionnelles To cite this version : HAL Id : tel-00069826.
- Folstein, M.F., Folstein, S.E., McHugh, P.R., 1975. MINI-MENTAL STATE, A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *J. Psychiatr. Res.* 12, 189–198. doi:10.1016/0022-3956(75)90026-6
- Forster, Y., Naujoks, F., Neukum, A., Huestegge, L., 2017. Driver compliance to take-over requests with different auditory outputs in conditional automation. *Accid. Anal. Prev.* 109, 18–28. doi:10.1016/j.aap.2017.09.019
- Friedman, B.H., Thayer, J.F., 1998. Autonomic Balance Revisited: Panic Anxiety and HRV. *J. Psychosom. Res.* 44 1 , 133–151.
- Galéra, C., Orriols, L., M'Bailara, K., Laborey, M., Contrand, B., Ribéreau-Gayon, R., Masson, F., Bakiri, S., Gabaude, C., Fort, A., Maury, B., Lemercier, C., Cours, M., Bouvard, M.P., Lagarde, E., 2012. Mind wandering and driving: Responsibility case-control. *BMJ* 345 7888 . doi:10.1136/bmj.e8105
- Gandhi, N.J., Katnani, H.A., 2012. Interactions of eye and eyelid movements. *Oxford Handb. Eye Movements* September . doi:10.1093/oxfordhb/9780199539789.013.0017
- Gold, C., Damböck, D., Lorenz, L., Bengler, K., 2013. “ Take over !” How long does it take to get the driver back into the loop? *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc.* 57 1 , 1938–1942. doi:10.1177/1541931213571433
- Gold, C., Happee, R., Bengler, K., 2017. Modeling take-over performance in level 3 conditionally automated vehicles. *Accid. Anal. Prev.* January 2019 , 0–1. doi:10.1016/j.aap.2017.11.009
- 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. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 58 4 , 642–652. doi:10.1177/0018720816634226
- Golińska, A.K., 2013. Poincaré plots in analysis of selected biomedical signals. *Stud. Logic, Gramm. Rhetor.* 35 48 , 117–127. doi:10.2478/slgr-2013-0031
- Granholm, E., Steinhauer, S.R., 2004. Pupillometric measures of cognitive and emotional processes. *Int. J. Psychophysiol.* 52 1 , 1–6. doi:10.1016/j.ijpsycho.2003.12.001
- Groh, J.M., Sparks, D.L., 1996. Saccades to somatosensory targets. II. Motor convergence in primate superior colliculus. *J. Neurophysiol.* 75 1 , 428–438. doi:10.1152/jn.1996.75.1.428

- Habchi, O., 2016. attention visuo-spatiale Ouazna Habchi To cite this version : HAL Id : tel-01289967 Saccades oculaires , adaptation sensori-motrice et attention visuo-spatiale.
- Happee, R., Gold, C., Radlmayr, J., Hergeth, S., Bengler, K., 2017. Take-over performance in evasive manoeuvres. *Accid. Anal. Prev.* 106, 211–222. doi:10.1016/j.aap.2017.04.017
- Hasler, R., Perroud, N., Meziane, H.B., Herrmann, F., Prada, P., Giannakopoulos, P., Deiber, M.P., 2016. Attention-related EEG markers in adult ADHD. *Neuropsychologia* 87, 120–133. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2016.05.008
- Hayashi, H., Oka, N., Kamezaki, M., Sugano, S., 2020. Development of a Situational Awareness Estimation Model Considering Traffic Environment for Unscheduled Takeover Situations. *Int. J. Intell. Transp. Syst. Res.* doi:10.1007/s13177-020-00231-4
- Hayward, J.C., 1972. Near-Miss Determination Through Use of a scale of Danger. *Highw. Res. Board* 384 , 24–34.
- Henderson, J.M., 2003. Human gaze control during real-world scene perception. *Trends Cogn. Sci.* 7 11 , 498–504. doi:10.1016/j.tics.2003.09.006
- Hergeth, S., Lorenz, L., Vilimek, R., Krems, J.F., 2016. Keep Your Scanners Peeled: Gaze Behavior as a Measure of Automation Trust during Highly Automated Driving. *Hum. Factors* 58 3 , 509–519. doi:10.1177/0018720815625744
- Jang, D., Yang, I., Kim, S., 2020. Detecting mind-wandering from eye movement and oculomotor data during learning video lecture. *Educ. Sci.* 10 3 , 1–13. doi:10.3390/educsci10030051
- Johns, M., 1991. A New Method for Measuring Daytime Sleepiness : The Epworth Sleepiness Scale. *Sleep* 14 6 , 540–545. doi:10.1093/sleep/14.6.540
- Kahneman, D., Beatty, J., 1966. Pupil diameter and load on memory. *Science (80- )*. 154 3756 , 1583–1585. doi:10.1126/science.154.3756.1583
- Kamzanova, A.T., Kustubayeva, A.M., Matthews, G., 2014. Use of EEG workload indices for diagnostic monitoring of vigilance decrement. *Hum. Factors* 56 6 , 1136–1149. doi:10.1177/0018720814526617
- Kim, J., 2018. Take-over performance analysis depending on the drivers' non-driving secondary tasks in automated vehicles, in: 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). IEEE, pp. 1364–1366. doi:10.1109/ICTC.2018.8539431
- Körber, M., Bengler, K., 2018. Introduction Matters : Manipulating Trust in Automation and Reliance in Automated Driving 66 January , 18–31. doi:10.1016/j.apergo.2017.07.006
- Körber, M., Gold, C., Lechner, D., Bengler, K., 2016. The influence of age on the take-over of vehicle control in highly automated driving 39, 19–32. doi:10.1016/j.trf.2016.03.002
- Körber, M., Weißgerber, T., Blaschke, C., Farid, M., Kalb, L., 2015. Prediction of take-over time in highly automated driving by two psychometric tests. *Dyna* 82 193 , 195–201. doi:10.15446/dyna.v82n193.53496
- Kusano, K.D., Gabler, H., 2011. Method for Estimating Time to Collision at Braking in Real-World , Lead Vehicle Stopped Rear-End Crashes for Use in Pre-Crash System Design. *Passeng. cars-Mechanical Syst.* 4 1 , 435–443. doi:10.4271/2011-01-0576
- Lal, S.K.L., Craig, A., 2002. Driver fatigue: Electroencephalography and psychological assessment. *Psychophysiology* 39 3 , 313–321. doi:10.1017/S0048577201393095
- Lee, D.N., 1976. A theory of visual control of braking based on information about time to collision.

Perception 54, 437–459. doi:10.1068/p050437

- Lerner, J.S., Li, Y., Valdesolo, P., Kassam, K.S., 2015. Emotion and decision making. *Annu. Rev. Psychol.* 66, 799–823. doi:10.1146/annurev-psych-010213-115043
- Li, S., Blythe, P., Guo, W., Namdeo, A., 2019. Investigating the effects of age and disengagement in driving on driver's takeover control performance in highly automated vehicles. *Transp. Plan. Technol.* 42(5), 470–497. doi:10.1080/03081060.2019.1609221
- Li, S., Blythe, P., Guo, W., Namdeo, A., 2018. Investigation of older driver's takeover performance in highly automated vehicles in adverse weather conditions. *Accid. Anal. Prev.* 129, 1157–1165. doi:10.1049/iet-its.2018.0104
- Liu, N.H., Chiang, C.Y., Chu, H.C., 2013. Recognizing the degree of human attention using EEG signals from mobile sensors. *Sensors (Switzerland)* 13(8), 10273–10286. doi:10.3390/s130810273
- Lorenz, L., Kerschbaum, P., Schumann, J., 2015. Designing take over scenarios for automated driving : How does augmented reality support the driver to get back into the loop ? *Accid. Anal. Prev.* 58(1), 1681–1685. doi:10.1177/1541931214581351
- Louw, T., Kountouriotis, G.K., Carsten, O., Merat, N., 2015. Driver Inattention During Vehicle Automation : How Does Driver Engagement Affect Resumption Of Control ?, in: 4th International Driver Distraction and Inattention Conference, Sydney, New South Wales.
- Louw, T., Markkula, G., Boer, E., Madigan, R., Carsten, O., Merat, N., 2017. Coming back into the loop : Drivers' perceptual-motor performance in critical events after automated driving. *Accid. Anal. Prev.* 108 February, 9–18. doi:10.1016/j.aap.2017.08.011
- Louw, T., Merat, N., 2017. Are you in the loop ? Using gaze dispersion to understand driver visual attention during vehicle automation. *Transp. Res. Part C* 76, 35–50. doi:10.1016/j.trc.2017.01.001
- Ma, S., Zhang, W., Yang, Z., Kang, C., Wu, C., Chai, C., Shi, J., Li, H., 2020. Promote or inhibit: An inverted U-shaped effect of workload on driver takeover performance. *Traffic Inj. Prev.* 21(7), 482–487. doi:10.1080/15389588.2020.1804060
- Marberger, C., Mielenz, H., Naujoks, F., Radlmayr, J., Bengler, K., Wandtner, B., 2017. Understanding and Applying the Concept of " Driver Availability " in Automated Driving 4. doi:10.1007/978-3-319-60441-1
- Markkula, G., Benderius, O., Wolff, K., Wahde, M., 2012. A review of near-collision driver behavior models. *Hum. Factors* 54(6), 1117–1143. doi:10.1177/0018720812448474
- Markkula, G., Engström, J., Lodin, J., Bårgman, J., Victor, T., 2016. A farewell to brake reaction times ? Kinematics-dependent brake response in naturalistic rear-end emergencies. *Accid. Anal. Prev.* 95, 209–226. doi:10.1016/j.aap.2016.07.007
- Markkula, G., Romano, R., Madigan, R., Fox, C.W., Giles, O.T., Merat, N., 2018. Models of Human Decision-Making as Tools for Estimating and Optimizing Impacts of Vehicle Automation. *Transp. Res. Rec.* 2672(37), 153–163. doi:10.1177/0361198118792131
- Marshall, S.P., 2002. The Index of Cognitive Activity: Measuring cognitive workload, in: *Proceedings of the 2002 IEEE 7th Conference on Human Factors and Power Plants.* pp. 75–79. doi:10.1109/hfpp.2002.1042860
- Matthews, G., Desmond, P.A., 2002. Task-induced fatigue states and simulated driving performance. *Q. J. Exp. Psychol. Sect. A Hum. Exp. Psychol.* 55(2), 659–686. doi:10.1080/02724980143000505

- Mcdonald, A.D., Alambeigi, H., Texas, A., Station, C., Engström, J., Tech, V., Markkula, G., Vogelpohl, T., Braunschweig, T.U., Dunne, J., Yuma, N., Texas, A., Station, C., 2019. Toward Computational Simulations of Behavior During Automated Driving Takeovers : A Review of the Empirical and Modeling Literatures. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 61 4 , 642–688. doi:10.1177/0018720819829572
- Melcher, V., Rauh, S., Diederichs, F., Bauer, W., 2015. Take-Over Requests for automated driving. *Procedia Manuf.* 3, 2867–2873. doi:10.1016/j.promfg.2015.07.788
- Merat, N., Seppelt, B., Louw, T., Engström, J., Lee, J.D., Johansson, E., Green, C.A., Katazaki, S., Monk, C., Itoh, M., McGehee, D., Sunda, T., 2019. The “ Out-of-the-Loop ” concept in automated driving : proposed definition , measures and implications. *Cogn. Technol. Work* 21 1 , 87–98. doi:10.1007/s10111-018-0525-8
- Michael, N.J., 2011. Cardiac and electroencephalographic measures of workload associated with secondary tasks while driving.
- Michaels, R.M., Cozan, L.W., 1963. Perceptual and Field Factors Causing Lateral Displacement. *Highw. Res. Board* 25, 1–13.
- Michon, J.A., 1985. Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do? doi:10.1007/978-1-4613-2173-6\_19
- Mills, M., Hollingworth, A., Stigchel, S. Van der, Hoffman, L., Dodd, M.D., 2011. Examining the Influence of Task Set on Eye Movements and Fixations. *J. Vis.* 11(8). doi:10.1167/11.8.17.Examining
- Mok, B., Johns, M., Lee, K.J., Miller, D., Sirkin, D., Ive, P., Ju, W., 2015. Emergency , Automation Off : Unstructured Transition Timing for Distracted Drivers of Automated Vehicles, in: *IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. doi:10.1109/ITSC.2015.396
- Mole, C., Pekkanen, J., Sheppard, W., Louw, T., Romano, R., Merat, N., Markkula, G., Wilkie, R., 2020. Predicting takeover response to silent automated vehicle failures. *PLoS One* 15 11 November , 1–25. doi:10.1371/journal.pone.0242825
- Mole, C.D., Lappi, O., Giles, O., Markkula, G., Mars, F., Wilkie, R.M., 2019. Getting Back Into the Loop: The Perceptual-Motor Determinants of Successful Transitions out of Automated Driving. *Hum. Factors* 61 7 , 1037–1065. doi:10.1177/0018720819829594
- Moriguchi, A., Otsuka, A., Kohara, K., Mikami, H., Katahira, K., Tsunetoshi, T., Higashimori, K., Ohishi, M., Yo, Y., Ogihara, T., 1992. Spectral change in heart rate variability in response to mental arithmetic before and after the beta-adrenoceptor blocker, carteolol. *Clin. Auton. Res.* 2 4 , 267–270. doi:10.1007/BF01819547
- Mullen, R., Faull, A., Jones, E.S., Kingston, K., 2012. Attentional focus and performance anxiety: Effects on simulated race-driving performance and heart rate variability. *Front. Psychol.* 3 OCT , 1–10. doi:10.3389/fpsyg.2012.00426
- Naujoks, F., Befelein, D., Wiedemann, K., Neukum, A., 2018. A review of non-driving-related tasks used in studies on automated driving. *Adv. Intell. Syst. Comput.* 597 November , 525–537. doi:10.1007/978-3-319-60441-1\_52
- Naujoks, F., Mai, C., Neukum, A., 2014. The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions, in: *5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*.
- Naujoks, F., Purucker, C., Wiedemann, K., Marberger, C., Gmbh, R.B., 2019. Noncritical State Transitions During Conditionally Automated Driving on German Freeways : Effects of Non –

- Driving Related Tasks on Takeover Time and Takeover Quality. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 61 4 , 596–613. doi:10.1177/0018720818824002
- Navon, D., Gopher, D., 1979. On the economy of the human-processing system. *Psychol. Rev.* 86 3 , 214–255. doi:10.1037//0033-295x.86.3.214
- Park, G., Thayer, J.F., 2014. From the heart to the mind: Cardiac vagal tone modulates top-down and bottom-up visual perception and attention to emotional stimuli. *Front. Psychol.* 5 MAY , 1–8. doi:10.3389/fpsyg.2014.00278
- Partinen, M., Gislason, T., 1995. Basic Nordic Sleep Questionnaire (BNSQ) a quantitated measure of subjective sleep complaints. *J. Sleep Res.* 4, 150–155. doi:10.1111/j.1365-2869.1995.tb00205.x
- Payre, W., Cestac, J., 2013. Fully Automated Driving : Impact of Trust and Practice on Manual Control Recovery. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 58 2 , 229–241. doi:10.1177/0018720815612319
- Petermeijer, S., Bazilinskyy, P., Bengler, K., Winter, J. De, 2017. Take-over again : Investigating multimodal and directional TORs to get the driver back into the loop. *Appl. Ergon.* 62, 204–215. doi:10.1016/j.apergo.2017.02.023
- Philip, P., Micoulaud-Franchi, J.-A., Lagarde, E., 2015. Attention deficit hyperactivity disorder symptoms, sleepiness and accidental risk in 36140 regularly registered highway drivers. *PLoS One* 10 9 , 1–14. doi:10.1371/journal.pone.0138004
- Philip, P., Sagaspe, P., Taillard, J., Valtat, C., Moore, N., Åkerstedt, T., Charles, A., Bioulac, B., 2005. Fatigue, sleepiness, and performance in simulated versus real driving conditions. *Sleep* 28 12 , 1511–1516. doi:10.1093/sleep/28.12.1511
- Philip, P., Taillard, J., Klein, E., Sagaspe, P., Charles, A., Davies, W.L., Guilleminault, C., Bioulac, B., 2003. Effect of fatigue on performance measured by a driving simulator in automobile drivers. *J. Psychosom. Res.* 55 3 , 197–200. doi:10.1016/S0022-3999(02)00496-8
- Philip, P., Taillard, J., Sagaspe, P., Valtat, D., 2004. Age , performance and sleep deprivation. *J. Sleep Res.* 13 2 , 105–110. doi:10.1111/j.1365-2869.2004.00399.x
- Politis, I., Brewster, S., Pollick, F., 2017. Using multimodal displays to signify critical handovers of control to distracted autonomous car drivers. *Int. J. Mob. Hum. Comput. Interact.* 9 3 , 1–16. doi:10.4018/ijmhci.2017070101
- Pomplun, M., Ritter, H., Velichkovsky, B., 1996. Disambiguating complex visual information: Towards communication of personal views of a scene. *Perception* 25 8 , 931–948. doi:10.1068/p250931
- Putman, P., Verkuil, B., Arias-Garcia, E., Pantazi, I., van Schie, C., 2014. EEG theta/beta ratio as a potential biomarker for attentional control and resilience against deleterious effects of stress on attention. *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 14 2 , 782–791. doi:10.3758/s13415-013-0238-7
- Radlmayr, J., Gold, C., 2014. 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*. pp. 2063–2067. doi:10.1177/1541931214581434
- Ramanoel, S., York, E., Habas, C., 2018. Correction: Participation of the caudal cerebellar lobule IX to the dorsal attentional network. [*Cerebellum Ataxias.*, 5, (2018) (9)] DOI: 10.1186/s40673-018-0088-8. *Cerebellum and Ataxias* 5 1 , 1–5. doi:10.1186/s40673-018-0089-7
- Rasmussen, J., 1983. Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.* 13 3 , 257–266.

- Rayner, K., 1998. Eye Movements in Reading and Information Processing: 20 Years of Research. *Psychol. Bull.* 124 3 , 372–422. doi:10.1037/0033-2909.124.3.372
- Richards, J.E., 1987. Infant Visual Sustained Attention and Respiratory Sinus Arrhythmia. *Child Dev.* 58 2 , 488–496. doi:10.2307/1130525
- Sagaspe, P., Taillard, J., Amieva, H., Beck, A., Rascol, O., Dartigues, J.-F., Capelli, A., Philip, P., 2012. Influence of Age , Circadian and Homeostatic Processes on Inhibitory Motor Control : A Go / Nogo Task Study. *PLoS One* 7 6 . doi:10.1371/journal.pone.0039410
- Schmidt, J., Dreißig, M., Stolzmann, W., Rötting, M., 2017. The influence of prolonged conditionally automated driving on the take-over ability of the driver. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc.* 61 1 , 1974–1978. doi:10.1177/1541931213601972
- Senders, J.W., Kristofferson, A.B., Levison, H., Dietrich, C.W., Ward, J.L., 1967. The Attentional Demand of Automobile Driving. *Highw. Res. Board* 15–33.
- Shepherd, M., Findlay, J.M., Hockey, R.J., 1986. The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A The relationship between eye movements and spatial attention The Relationship between Eye Movements and Spatial Attention. *Q. J. Exp. Psychol.* 38 3 , 475–491. doi:10.1080/14640748608401609
- Smalianchuk, I., Jagadisan, U.K., Gandhi, N.J., 2018. Instantaneous midbrain control of saccade velocity. *J. Neurosci.* 38 47 , 10156–10167. doi:10.1523/JNEUROSCI.0962-18.2018
- Sportillo, D., Paljic, A., Ojeda, L., 2018. Get ready for automated driving using Virtual Reality. *Accid. Anal. Prev.* 118, 102–113. doi:10.1016/j.aap.2018.06.003
- Stojmenova, K., Sodnik, J., 2018. Detection-response task—uses and limitations. *Sensors (Switzerland)* 18 2 , 594. doi:10.3390/s18020594
- Stoner, H.A., Fisher, D.L., Jr., M.M., n.d. Simulator and Scenario Factors Influencing Simulator Sickness. D. L. Fish. M. Rizzo, J. K. Caird J. D. Lee (eds.), *handb. Driv. Simul. engi-neering, Med. Psychol.* 14.1–14.24). Stoner 2011 pub-lisher Locat. CRC Press Taylor& Fr. Gr. 6000 BrokenSound Parkw. NW Suite 300 Boca . doi:10.1201/b10836-15
- Stuart, S., Galna, B., Lord, S., Rochester, L., Member, A.G.-I., 2014. Quantifying Saccades While Walking: Validity of a Novel Velocity-Based Algorithm for Mobile Eye-Tracking October . doi:10.1109/EMBC.2014.6944931
- Tancini, F., Wu, Y.-L., Schweizer, W.B., Gisselbrecht, J.-P., Boudon, C., Jarowski, P.D., Beels, M.T., Biaggio, I., Diederich, F., 2012. 1,1-Dicyano-4-[4-(diethylamino)phenyl]buta-1,3-dienes: Structure-Property Relationships. *European J. Org. Chem.* 2012 14 , 2756–2765. doi:10.1002/ejoc.201200111
- Tatler, B.W., Wade, N.J., Kwan, H., Findlay, J.M., Velichkovsky, B.M., 2010. Yabus, eye movements, and vision. *Iperception.* 1 1 , 7–27. doi:10.1068/i0382
- Thayer, J.F., Hansen, A.L., Saus-Rose, E., Johnsen, B.H., 2009. Heart rate variability, prefrontal neural function, and cognitive performance: The neurovisceral integration perspective on self-regulation, adaptation, and health. *Ann. Behav. Med.* 37 2 , 141–153. doi:10.1007/s12160-009-9101-z
- Tlig, M., Machin, M., Kerneis, R., Arbaretier, E., Zhao, L., Meurville, F., Frank, J.V.A.N., 2018. Contribution à la sécurisation du véhicule autonome : Modélisation comportementale avec AltaRica Contribution to the safety of autonomous vehicle : Behavioral modeling with AltaRica 1–7.

- Vogelpohl, T., Kühn, M., Hummel, T., Gehlert, T., Vollrath, M., 2018a. Transitioning to manual driving requires additional time after automation deactivation. *Transp. Res. Part F Psychol. Behav.* 55, 464–482. doi:10.1016/j.trf.2018.03.019
- Vogelpohl, T., Kühn, M., Hummel, T., Vollrath, M., 2018b. Asleep at the automated wheel — Sleepiness and fatigue during highly automated driving. *Accid. Anal. Prev.* March , 0–1. doi:10.1016/j.aap.2018.03.013
- Vollmer, M., 2019. HRVTool – an Open-Source Matlab Toolbox for Analyzing Heart Rate Variability Machine Independent Beat file 46, 1–4. doi:10.22489/CinC.2019.032
- Walch, M., Lange, K., Baumann, M., Weber, M., 2015. Autonomous Driving : Investigating the Feasibility of Car-Driver Handover Assistance 11–18.
- Wan, J., Wu, C., 2018. The Effects of Lead Time of Take-Over Request and Nondriving Tasks on Taking-Over Control of. *IEEE Trans. Human-Machine Syst.* PP, 1–10. doi:10.1109/THMS.2018.2844251
- Wandtner, B., Schömig, N., Schmidt, G., 2018a. Effects of Non-Driving Related Task Modalities on Takeover Performance in Highly Automated Driving. *Hum. Factors* 60 6 , 870–881. doi:10.1177/0018720818768199
- Wandtner, B., Schömig, N., Schmidt, G., 2018b. Secondary task engagement and disengagement in the context of highly automated driving. *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 58, 253–263. doi:10.1016/j.trf.2018.06.001
- Ware, J.E., Ware, J., 2018. The MOS 36-item short-form health survey ( SF-36 ) May . doi:10.1097/00005650-199206000-00002
- Wiedemann, K., Naujoks, F., Wörle, J., Kenntner-mabiala, R., Kaussner, Y., Neukum, A., 2018. Effect of different alcohol levels on take-over performance in conditionally automated driving 115 December 2017 , 89–97. doi:10.1016/j.aap.2018.03.001
- Wright, T.J., Agrawal, R., Samuel, S., Wang, Y., Zilberstein, S., Fisher, D.L., 2017. Effects of Alert Cue Specificity on Situation Awareness in Transfer of Control in Level 3 Automation.
- Zeeb, K., Buchner, A., Schrauf, M., 2015. What determines the take-over time ? An integrated model approach of driver take-over after automated driving. *Accid. Anal. Prev.* 78, 212–221. doi:10.1016/j.aap.2015.02.023
- Zeeb, K., Härtel, M., Buchner, A., Schrauf, M., 2017. Why is steering not the same as braking ? The impact of non-driving related tasks on lateral and longitudinal driver interventions during conditionally automated driving. *Transp. Res. Part F Psychol. Behav.* 50, 65–79. doi:10.1016/j.trf.2017.07.008
- Zeeb Kathrin, Buchner, A., Schrauf, M., 2016. Is take-over time all that matters ? The impact of visual-cognitive load on driver take-over quality after conditionally automated driving. *Accid. Anal. Prev.* 92, 230–239. doi:10.1016/j.aap.2016.04.002
- Zénon, A., Krauzlis, R., 2014. Le colliculus supérieur: Centre sous-cortical de la sélection visuelle [Superior colliculus as a subcortical center for visual selection] *HHS Public Access. Med Sci* 30 7 , 637–643. doi:10.1051/medsci/20143006013.Le
- Zhang, B., Winter, J. De, Varotto, S., Happee, R., Martens, M., 2019. Determinants of take-over time from automated driving : A meta-analysis of 129 studies. *Transp. Res. Part F Psychol. Behav.* 64, 285–307. doi:10.1016/j.trf.2019.04.020
- Zhao, C., Zhao, M., Liu, J., Zheng, C., 2012. Electroencephalogram and electrocardiograph assessment of mental fatigue in a driving simulator. *Accid. Anal. Prev.* 45, 83–90.

doi:10.1016/j.aap.2011.11.019

Zheng, X.L., Li, X.S., Ren, Y.Y., Meng, X.Y., 2018. Vehicle driving characteristics on rural highways and the evaluation of stability performance based on lorenz scatter plot. *Lect. Notes Electr. Eng.* 419, 479–494. doi:10.1007/978-981-10-3551-7\_38

# ANNEXES

## Annexe 1: Évaluation des troubles du sommeil

N° de Sélection :   _ _   _ _	Date :   _ _   _ _   /   _ _   _ _   /   _ _   _ _   _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V0 V1.0 du 14/08/2019
-------------------------------	---	--

### EPWORTH SLEEPINESS SCALE (ESS)

#### Consignes:

**Vous arrive-t-il de somnoler ou de vous endormir - et pas seulement de vous sentir fatigué - dans les situations suivantes?**

Cette question s'adresse à votre vie dans les 3 derniers mois.

Même si vous ne vous êtes pas trouvé récemment dans l'une des situations suivantes, essayez de vous représenter comment elle aurait pu vous affecter.

Choisissez dans l'échelle suivante le nombre le plus approprié à chaque situation :

0 = ne somnolerait jamais

1 = faible chance de s'endormir

2 = chance moyenne de s'endormir

3 = forte chance de s'endormir

#### Situations :

1) Assis en train de lire	0	1	2	3
2) En train de regarder la télévision	0	1	2	3
3) Assis, inactif, dans un endroit public (au cinéma, en réunion...)	0	1	2	3
4) Comme passager dans une voiture roulant sans arrêt pendant une heure	0	1	2	3
5) Allongé l'après-midi pour se reposer quand les circonstances le permettent	0	1	2	3
6) Assis en train de parler à quelqu'un	0	1	2	3
7) Assis calmement après un repas sans alcool	0	1	2	3
8) Dans une voiture immobilisée quelques minutes dans un encombrement	0	1	2	3

#### Ces envies de dormir surviennent-elles ?

- Seulement après les repas
- A certaines heures du jour, toujours les mêmes
- La nuit
- A n'importe quelle heure du jour

## Annexe 2: Évaluation de la qualité de sommeil sur les 3 derniers mois

N° de Sélection :  _ _ _ _	Date :  _ _ _ _ / _ _ _ _ / _ _ _ _ _ _ _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V0 V1.0 du 14/08/2019
----------------------------	--	--

### BASIC NORDIC SLEEP QUESTIONNAIRE (BNSQ)

#### Instructions :

- 1) Lisez attentivement chaque question avant d'y répondre
- 2) Répondez à toutes les questions
- 3) Répondez aux questions en faisant référence à votre vie des **trois derniers mois**.
- 4) Pour les questions à choix multiples, entourer un seul nombre. Pour les autres questions écrire en chiffre la réponse.

#### 1. Avez-vous eu du mal à vous endormir au cours de ces trois derniers mois ?

- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 nuits par semaine
- 4 = 3 à 5 nuits par semaine
- 5 = toutes les nuits ou presque

#### 2. Combien de temps en moyenne vous faut-il pour vous endormir lorsque vous vous êtes couché dans votre lit ?

- A = lorsque je travaille : je mets \_\_\_\_\_ minutes pour m'endormir.
- B = lorsque je suis en vacances : je mets \_\_\_\_\_ minutes pour m'endormir.

#### 3. Combien de fois vous êtes-vous réveillé dans la nuit au cours de ces trois derniers mois ?

- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 nuits par semaine
- 4 = 3 à 5 nuits par semaine
- 5 = toutes les nuits ou presque

N° de Sélection :  _ _ _ _	Date :  _ _ _ _ / _ _ _ _ / _ _ _ _ _ _ _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V0 V1.0 du 14/08/2019
Code Sujet :  _ _ _ _		

**4. Si vous vous réveillez la nuit, combien de fois vous réveillez-vous en moyenne au cours d'une nuit (au cours de ces trois derniers mois) ?**

- 1 = je ne me réveille jamais la nuit
- 2 = 1 fois par nuit
- 3 = 2 fois par nuit
- 4 = 3 à 4 fois par nuit
- 5 = plus de 5 fois par nuit

**5. Au cours de ces trois derniers mois, combien de fois vous êtes-vous réveillé trop tôt sans pouvoir vous rendormir ?**

- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 nuits par semaine
- 4 = 3 à 5 nuits par semaine
- 5 = toutes les nuits ou presque

**6. Au cours de ces trois derniers mois comment avez-vous dormi ?**

- 1 = bien
- 2 = plutôt bien
- 3 = ni bien ni mal
- 4 = plutôt mal
- 5 = mal

**7. Au cours de ces 3 derniers mois, avez-vous pris des médicaments prescrits par votre médecin pour dormir ?**

- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 nuits par semaine
- 4 = 3 à 5 nuits par semaine
- 5 = toutes les nuits ou presque

N° de Sélection :   _ _   _ _	Date :   _ _   _ _   /   _ _   _ _   /   _ _   _ _   _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V0 V1.0 du 14/08/2019
Code Sujet :   _ _   _ _		

**8. Le matin juste après le lever, vous sentez-vous très somnolent ?**

- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 jours par semaine
- 4 = 3 à 5 jours par semaine
- 5 = tous les jours ou presque

**9. Durant la journée, vous sentez-vous extrêmement somnolent ?**

- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 jours par semaine
- 4 = 3 à 5 jours par semaine
- 5 = tous les jours ou presque

**10. Au cours de ces trois derniers mois, avez-vous eu une envie irrésistible de vous endormir au travail ?**

- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 jours par semaine
- 4 = 3 à 5 jours par semaine
- 5 = tous les jours ou presque

**11a. Au cours de ces trois derniers mois, avez-vous eu une envie irrésistible de vous endormir durant vos heures de loisir ?**

- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 jours par semaine
- 4 = 3 à 5 jours par semaine
- 5 = tous les jours ou presque

N° de Sélection :  _ _ _ _	Date :  _ _ _ _ / _ _ _ _ / _ _ _ _ _ _ _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V0 V1.0 du 14/08/2019
Code Sujet :  _ _ _ _		

**11b. Prenez-vous des médicaments ou des substances (y compris caféine) pour vous tenir éveillé ?**

- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 nuits par semaine
- 4 = 3 à 5 nuits par semaine
- 5 = toutes les nuits ou presque

Si oui lesquels : .....

Quantité de café (ou thé) consommé par jour : .....

**12. Combien d'heures dormez-vous habituellement ?**

Je dors environ \_\_\_\_\_ heures par nuit

**13. À quelle heure vous couchez-vous d'habitude (afin de dormir) ?**

A = durant les jours de travail : \_\_\_\_\_

B = durant les jours de repos : \_\_\_\_\_

**14. À quelle heure vous réveillez-vous d'habitude ?**

A = durant les jours de travail : \_\_\_\_\_

B = durant les jours de repos : \_\_\_\_\_

**15a. Faites-vous souvent des siestes dans la journée ?**

- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 jours par semaine
- 4 = 3 à 5 jours par semaine
- 5 = tous les jours ou presque

**15b. Si vous faites une sieste, combien de temps dure-t-elle habituellement ?**

Ma sieste dure habituellement environ \_\_\_\_\_ heures \_\_\_\_\_ minutes.

N° de Sélection :  _ _ _ _	Date :  _ _ _ _ / _ _ _ _ / _ _ _ _ _ _ _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V0 V1.0 du 14/08/2019
Code Sujet :  _ _ _ _		

**16. Ronflez-vous en dormant (demandez à quelqu'un si vous n'êtes pas sûr) ?**

- 0 = je ne sais pas
- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 nuits par semaine
- 4 = 3 à 5 nuits par semaine
- 5 = toutes les nuits ou presque

**17. Comment ronflez-vous (demandez à quelqu'un de décrire vos ronflements) ?**

- 0 = je ne sais pas
- 1 = je ne ronfle pas
- 2 = mes ronflements sont réguliers et d'intensité proche d'une discussion à voix basse
- 3 = mes ronflements sont réguliers et plutôt bruyants
- 4 = mes ronflements sont réguliers et très bruyants (on m'entend dans la pièce d'à côté)
- 5 = je ronfle très fortement et par intermittence (il y a des pauses respiratoires silencieuses et des fois des reprises très bruyantes accompagnées de suffocations).

**18. Présentez-vous des pauses respiratoires (apnées du sommeil) au cours du sommeil (des personnes vous ont-elles dit que vous vous arrêtiez de respirer quand vous dormiez) ?**

- 0 = je ne sais pas
- 1 = jamais ou moins d'une fois par mois
- 2 = moins d'une fois par semaine
- 3 = 1 à 2 nuits par semaine
- 4 = 3 à 5 nuits par semaine
- 5 = toutes les nuits ou presque

**19. Si vous ronflez au moins 1 à 2 fois par semaine, depuis combien d'années ronflez-vous (si vous ne le savez pas demandez le à quelqu'un) ?**

Je ronfle depuis \_\_\_\_ ans. J'avais \_\_\_\_ ans quand j'ai commencé à ronfler.

N° de Sélection :  _ _ _ _	Date :  _ _ _ _ / _ _ _ _ / _ _ _ _ _ _ _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V0 V1.0 du 14/08/2019
----------------------------	--	--

**20. De combien d'heures de sommeil avez-vous besoin (combien d'heures voudriez-vous dormir si vous aviez la possibilité de dormir aussi longtemps que vous le souhaiteriez) ?**

J'ai besoin de \_\_\_\_ heures et \_\_\_\_ minutes de sommeil par nuit.

**21. Prenez-vous des médicaments ? Si oui, lesquels ?**

---

---

---

---

---

**22. Si vous avez des problèmes de sommeil, quels sont-ils (décrivez vos problèmes en quelques mots) ?**

---

---

---

---

---

## Annexe 3: Évaluation de la détresse psychologique (9 échelles)

N° de Sélection :  _ _ _ _	Date :  _ _ _ _ / _ _ _ _ / _ _ _ _ _ _ _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT VO V1.0 du 14/08/2019
Code Sujet :  _ _ _ _		

### The Symptom Checklist-90-R (SCL 90 R)

Voici une série de propositions décrivant divers symptômes. Nous vous demandons de lire attentivement chaque phrase. Afin de mieux connaître votre état, nous vous demandons d'y répondre. Pour chacune de ces propositions, attribuez un chiffre, en fonction de l'intensité avec laquelle vous avez été affecté(e) par ce symptôme, au cours des 7 jours précédents, y compris le jour du test ; Répondez à toutes les questions sans exception.

**0 = Non pas du tout**

**1 = Oui un peu**

**2 = Oui moyennement**

**3 = Oui beaucoup**

**4 = Oui extrêmement**

1. J'ai des maux de tête
2. Je me sens nerveux(se) et/ou je sens comme un tremblement intérieur
3. J'ai des pensées, des mots ou des idées que je ne voudrais pas avoir et qui ne veulent pas quitter mon esprit
4. J'ai des tendances à m'évanouir ou des vertiges
5. J'ai perdu le goût et le plaisir que j'éprouvais pour les choses sexuelles
6. J'ai l'impression d'être critique à l'égard des autres
7. J'ai l'idée que quelqu'un d'autre peut contrôler mes pensées
8. J'ai le sentiment que les autres sont responsables de la plupart de mes troubles
9. J'ai des difficultés à me rappeler des choses
10. Je suis ennuyé(e) par ma négligence et mon manque de soin
11. Je suis facilement contrarié(e) ou irrité(e)
12. J'ai des douleurs au cœur ou dans la poitrine
13. Je suis pris(e) de peur dans les espaces découverts ou dans les rues
14. Je me sens sans énergie ou ralenti(e)
15. Je pense en finir avec la vie
16. J'entends des voix que les autres n'entendent pas
17. J'ai des tremblements
18. J'ai l'impression qu'on ne peut pas avoir confiance dans la plupart des gens
19. J'ai mauvais appétit
20. Je pleure facilement

N° de Sélection :  _ _ _ _	Date :	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V0
Code Sujet :  _ _ _ _	_ _ _ / _ _ _ / _ _ _ _ _ _	V1.0 du 14/08/2019

21. Je me sens timide et mal à l'aise avec une personne du sexe opposé
22. J'ai l'impression d'être coincé(e) ou pris(e) au piège
23. Je suis subitement effrayé(e) sans aucune raison
24. J'ai des explosions de colère que je ne peux pas contrôler
25. J'ai peur de sortir seul(e) de chez moi
26. Je me reproche des choses
27. J'ai des douleurs à la partie inférieure du dos
28. Je me sens bloqué(e) devant la moindre chose à faire
29. J'ai un sentiment de solitude
30. J'ai le cafard
31. Des choses me tracassent ou me tourmentent trop
32. Je ne m'intéresse à rien
33. Je suis rempli(e) d'un sentiment de peur
34. Je suis facilement blessé
35. J'ai le sentiment que d'autres savent qu'elles sont mes pensées intimes
36. J'ai l'impression que les autres ne me comprennent pas, ou qu'ils ne me montrent pas de sympathie
37. J'ai l'impression que les gens sont inamicaux envers moi ou ne m'aiment pas
38. Je suis obligé(e) de faire les choses très lentement pour être certain(e) de bien les faire
39. J'ai l'impression que mon cœur bat très fort ou qu'il s'emballe
40. J'ai des nausées ou envie de vomir
41. Je me sens inférieur(e) aux autres
42. J'ai l'impression que mes muscles sont endoloris
43. J'ai l'impression d'être observé(e) par les autres et qu'on parle de moi
44. J'ai du mal à m'endormir
45. Je suis obligé(e) de vérifier et de revérifier ce que je fais
46. J'ai des difficultés à prendre des décisions
47. J'ai peur de voyager en autobus, en train ou en métro
48. J'ai des difficultés à respirer

N° de Sélection :   _ _   _ _	Date :   _ _   _ _   /   _ _   _ _   /   _ _   _ _   _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V0 V1.0 du 14/08/2019
-------------------------------	---	--

49. J'ai comme des bouffées de chaleur ou de froid
50. Je suis obligé(e) d'éviter certaines choses, certains endroits ou certaines activités car elle m'effrayent
51. J'ai l'impression que mon esprit se vide
52. J'ai l'impression d'engourdissement ou de fourmillement dans certaines parties de mon corps
53. J'ai l'impression d'avoir une boule dans la gorge
54. J'ai l'impression que l'avenir est sans espoir
55. J'ai des difficultés de concentrations
56. J'ai une sensation de faiblesse dans certaines parties de mon corps
57. J'ai l'impression d'être tendu(e)
58. J'ai l'impression de pesanteur dans les bras ou dans les jambes
59. J'ai des idées de mort ou l'idée de mourir
60. Je mange trop
61. Je me sens mal à l'aise quand on me regarde ou qu'on parle de moi
62. Il me vient des pensées qui ne sont pas les miennes
63. J'ai envie de battre, de blesser ou de faire du mal aux gens
64. Je me réveille tôt le matin (avant 7H)
65. Je dois recommencer certains actes tels que toucher, compter, nettoyer
66. Mon sommeil est agité ou troublé
67. J'ai des envies de mettre en pièces ou de casser des objets
68. J'ai des idées ou des croyances que les autres ne partagent pas
69. Je me sens très gêné(e) vis-à-vis des autres
70. Je me sens mal à l'aise dans la foule, par exemple dans les magasins ou au cinéma
71. Tout représente un effort pour moi
72. J'ai des bouffées de terreur ou de panique
73. Je suis mal à l'aise si je dois manger, boire en public
74. Je me dispute fréquemment
75. Je me sens nerveux(se) quand on me laisse seul(e)

N° de Sélection :  _ _ _ _	Date :	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V0
Code Sujet :  _ _ _ _	_ _ _ / _ _ _ / _ _ _ _ _ _	V1.0 du 14/08/2019

76. J'ai l'impression que les autres n'apprécient pas à sa juste valeur ce que je fais
77. Je me sens seul(e), même quand je suis avec d'autres gens
78. Je me sens si énervé(e) que je ne peux resté assis(se)
79. Je me sens bon(ne) à rien
80. J'ai l'impression que des choses familières sont étranges ou n'ont pas l'air réelles
81. Je cris ou je lance des objets
82. J'ai peur de m'évanouir en public
83. Je pense que les gens profiteraient de moi si je les laissais faire
84. J'ai des pensées liées au sexe qui me préoccupent beaucoup
85. Je pense que je devrais être puni(e) pour mes péchés
86. J'ai le sentiment d'être contraint(e) à faire des choses
87. Je pense que mon corps est atteint de quelque chose de grave
88. Je ne me sens jamais proche de quelqu'un
89. Je me sens coupable
90. Je pense que quelque chose va mal dans mon esprit

## Annexe 4: Évaluation des fonctions cognitives et de la capacité mnésique

N° de Sélection :  _ _ _ _	Date :  _ _ _ _ / _ _ _ _ / _ _ _ _ _ _ _ _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V1.0 du 14/08/2019
Code Sujet :  _ _ _ _		

### MINI MENTAL STATE EXAMINATION (MMSE)

**Consignes :** Les mots en caractères **gras** devront être lus clairement et lentement à haute voix au sujet. Les mots à utiliser en option apparaissent entre parenthèses. L'examen devra avoir lieu en privé et dans la langue du sujet. Cochez « Erreur » si la réponse est incorrecte ou « Correct » si la réponse est bonne. Commencez par poser les deux questions suivantes :

**Avez-vous des problèmes de mémoire ? Puis-je vous poser quelques questions concernant votre mémoire ?**

EVALUATION	REPONSE DU PATIENT	SCORE	
<b>ORIENTATION DANS LE TEMPS</b>			
<b>En quelle année sommes-nous ?</b>	1.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<b>Quel est le mois de l'année ?</b>	2.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<b>Quel est le jour du mois ?</b>	3.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<b>Quel est le jour de la semaine ?</b>	4.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<b>En quelle saison sommes-nous ?</b>	5.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<b>ORIENTATION DANS L'ESPACE *</b>			
<b>Où sommes-nous en ce moment ?</b>			
Quel est le pays ?	1.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
Quel est le département ?	2.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
Quelle est la ville ?	3.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
Quel est le nom de l'hôpital ?	4.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
Quel est l'étage du bâtiment ?	5.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<i>* D'autres mots descriptifs qui sont appropriés au lieu et qui sont plus précis peuvent être utilisés et notés.</i>			
<b>APPRENTISSAGE *</b>			
<b>Ecoutez attentivement. Je vais vous dire trois mots. Vous devez les répéter une fois que je m'arrête. Êtes-vous prêt ? Les voilà... POMME (pause), CENTIME (pause), TABLE (pause).</b>	1. POMME	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<b>Répétez ces mots. (Répétez ces mots 5 fois au maximum, mais prenez en compte uniquement le score obtenu au premier essai.)</b>	2. CENTIME	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<b>Retenez ces mots. Je vais vous demander de les répéter dans quelques minutes.</b>	3. TABLE	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<i>* D'autres ensembles de mots (ex : PONEY, QUART, ORANGE) peuvent être utilisés et notés.</i>			

N° de Sélection :  __ _ _	Date :  __ _ _ / __ _ _ / __ _ _ _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V1.0 du 14/08/2019
Code Sujet :  __ _ _		

EVALUATION	REPONSE DU PATIENT	SCORE	
<b>ATTENTION ET CALCUL (série 7s) *</b>			
J'aimerais maintenant que vous soustrayez 7 de 100. Puis, continuez de soustraire 7 de chaque réponse jusqu'à ce que je vous dise d'arrêter.			
Soustrayez 7 de 100 [93]	1.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
Au besoin, dites <b>continuez</b> . [86]	2.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
Au besoin, dites <b>continuez</b> . [79]	3.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
Au besoin, dites <b>continuez</b> . [72]	4.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
Au besoin, dites <b>continuez</b> . [65]	5.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<i>* Une autre tâche (épeler le mot MONDE à l'envers) ne doit être proposée que si la personne examinée refuse d'exécuter la tâche de la Série 7s.</i>			
Ne remplacez par cette tâche et ne transférez le score obtenu que si la personne examinée refuse d'exécuter la tâche de la Série 7s. <b>Épeler le mot MONDE à l'endroit, puis à l'envers.</b> Corrigez l'orthographe du mot à l'endroit si celle-ci est incorrecte, mais notez uniquement le score obtenu lorsque le sujet a épeler le mot à l'envers	E = 1	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
	D = 1	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
	N = 1	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
	O = 1	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<b>RAPPEL</b> Quels étaient les 3 mots que je vous ai demandés de retenir ? (N'offrez aucune aide)	1. POMME	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
	2. CENTIME	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
	3. TABLE	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<b>NOMMER *</b>			
Qu'est-ce que c'est ? (Montrez un crayon)	1.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
Qu'est-ce que c'est ? (Montrez des clefs)	2.	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<i>* D'autres objets habituels (ex : lunettes, chaises, montre) peuvent être utilisés et notés.</i>			
<b>REPETITION</b>			
Je vais maintenant vous demander de répéter ce que je dis. Êtes-vous prêt ? « PAS DE MAIS, DE SI, NI DE ET. » <b>Demandez au sujet de répéter l'expression précédente.</b> (Répétez jusqu'à 5 fois, mais notez uniquement le score du premier essai.°	PAS DE MAIS, DE SI, NI DE ET	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1

N° de Sélection :  _ _ _ _	Date :  _ _ _ _ / _ _ _ _ / _ _ _ _ _ _ _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V1.0 du 14/08/2019
Code Sujet :  _ _ _ _		

EVALUATION	REPONSE DU PATIENT	SCORE	
<p>Détachez la quatrième page et coupez-la le long des lignes horizontales. Utilisez la moitié supérieure de la feuille (vierge) pour les items COMPREHENSION, ECRITURE ET DESSIN qui suivent. Utilisez la moitié inférieure de la feuille en tant que fiche de présentation pour les items LECTURE (« FERMEZ LES YEUX ») et DESSIN (pentagones s'entrecroisant).</p>			
<p><u>COMPREHENSION</u></p> <p>Ecoutez attentivement car je vais vous demander de faire quelque chose. Prenez cette feuille de la main droite (pause), pliez-la en deux (pause) et déposez-la sur la table</p>	PRENEZ-LA DE LA MAIN DROITE	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
	PLIEZ-LA EN DEUX	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
	DEPOSEZ-LA SUR LA TABLE	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<p><u>LECTURE</u></p> <p>Veuillez lire ceci et faire ce qu'il y a d'écrit. <i>(Montrez à la personne examinée les mots de la fiche de stimulation)</i></p>	FERMEZ LES YEUX	Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<p><u>ECRITURE</u></p> <p>Veuillez écrire une phrase. <i>(Si le sujet ne réagit pas, demandez-lui : Ecrivez à propos du temps qu'il fait)</i>. Placez le morceau de papier blanc (déplié) devant la personne examinée et donnez-lui un crayon ou un stylo. Notez 1 point si la phrase est compréhensible et si elle contient un sujet et un verbe. Ne tenez pas compte des fautes de grammaire ou d'orthographe.</p>		Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1
<p><u>DESSIN</u></p> <p>Veuillez recopier ce dessin. <i>(Montrez les pentagones s'entrecroisant de la fiche de présentation)</i>. Attribuez 1 point si le dessin représente deux figures à 5 côtés qui se coupent pour former une figure à 4 côtés.</p>		Erreur <input type="checkbox"/> 0	Correct <input type="checkbox"/> 1

**Score Total =** \_\_\_\_\_

(Faites la somme des scores

(30 points au maximum)

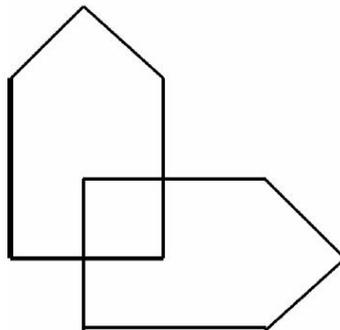
De tous les items)

N° de Sélection :  _ _ _ _	Date :  _ _ _ _ / _ _ _ _ / _ _ _ _ _ _ _ _	ANTIDOTE - CAHIER PARTICIPANT V1.0 du 14/08/2019
----------------------------	--	---

.....

**« FERMEZ LES YEUX »**

.....



## Annexe 5: Évaluation du mal du simulateur (Simulator Sickness)

### SIMULATOR SICKNESS QUESTIONNAIRE

Consignes : Entourez à quel point chaque symptôme ci-dessous vous affecte actuellement :

N°	Symptôme	Pas du tout 0	Légèrement 1	Modérément 2	Sévèrement 3
1	Inconfort général	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Fatigue	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Mal de tête	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Fatigue des yeux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Attention difficile	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Augmentation de la salivation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Transpiration	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Nausées	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Concentration difficile	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Impression d'avoir la tête pleine	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Vision floue	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Etourdissement les yeux ouverts	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Etourdissement les yeux fermés	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	Vertiges*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Conscience de l'estomac**	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Rots	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

\*Le vertige est connu comme une perte d'orientation par rapport à l'axe vertical

\*\*L'expression « conscience de l'estomac » est généralement utilisée pour indiquer un ressenti désagréable proche de la nausée

**Cotation de la version canadienne-française du Questionnaire sur les cybermalaises :**

Faire le Total des items 1 à 16 : échelle de 0 (pas du tout) à 3 (sévèrement).

- Nausée = 1 + 6 + 7 + 8 + 12 + 13 + 14 + 15 + 16
- Oculomoteur = 2 + 3 + 4 + 5 + 9 + 10 + 11

Total = (N+O)

Score	Analyse
0	Pas de symptômes
<5	Symptômes négligeables
5-10	Symptômes minimes
10-15	Symptômes significatifs
15-20	Symptômes préoccupants
>20	Problèmes sur le simulateur

Pour consulter les articles scientifiques sur la validation canadienne-française de ce questionnaire, veuillez-vous référer aux articles suivants :

BOUCHARD, S., Robillard, & Renaud, P. (2007). Revising the factor structure of the Simulator Sickness Questionnaire. Acte de colloque du *Annual Review of CyberTherapy and Telemedicine*, 5, 117-122.

BOUCHARD, S., St-Jacques, J., Renaud, P., & Wiederhold, B.K. (2009). Side effects of immersions in virtual reality for people suffering from anxiety disorders. *Journal of Cybertherapy and Rehabilitation*, 2(2), 127-137.

BOUCHARD, S. Robillard, G., Renaud, P., & Bernier, F. (2011). Exploring new dimensions in the assessment of virtual reality induced side-effects. *Journal of Computer and Information Technology*, 1(3), 20-32.

\*\*\*Version originale : Kennedy, R.S., Lane, N.E., Berbaum, K.S., & Lilienthal, M.G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *International Journal of Aviation Psychology*, 3(3), 203-220