

RAPPORT D'ÉTUDE

VOITURE AUTONOME CONTRÔLE HUMAIN

POUR



**Soutenir la recherche
pour prévenir les risques**



ANDRÉ DUFOUR

DÉCEMBRE 2017

RÉSUMÉ

Avec la démocratisation et la multiplication des systèmes de contrôle autonome dans les véhicules, le gain en termes de sécurité pour le conducteur et les autres usagers de la route est indéniable. Cependant, les interactions avec ces systèmes de contrôle deviennent de plus en plus complexes et peuvent avoir un impact non négligeable sur les performances de conduite. Dans cette étude nous nous sommes intéressés à la capacité des conducteurs à interagir avec des systèmes de contrôles longitudinaux et transversaux de la trajectoire du véhicule. Plus précisément, nous avons évalué la capacité des conducteurs à reprendre le contrôle du véhicule dans des situations à risque plus ou moins élevé. Les résultats montrent que la simple désactivation automatique du contrôle latéral dans un virage est difficilement gérée par les conducteurs. En effet, la majorité des conducteurs ne parviennent pas à ramener le véhicule dans l'axe de la voie dans des conditions optimales de sécurité. Ceci malgré un avertissement par affichage et signal sonore d'une désactivation du mode autonome et du retour en mode manuel. Ainsi dans une courbe à faible rayon sur l'autoroute, la majorité des conducteurs sortent dangereusement de la voie de circulation avant de reprendre le contrôle total de la trajectoire. Des situations qui nécessitent la reprise en main du véhicule lorsque celui-ci est encore en mode de contrôle autonome se sont avérées encore plus dangereuses pour les conducteurs. Le temps nécessaire avant de réaliser que le véhicule ne pourra pas gérer la situation (évitement d'une zone de chantier sur autoroute) peut atteindre plusieurs secondes ce qui, selon la situation, peut s'avérer amplement insuffisant pour éviter un accident. Nous pouvons en conclure que les nouvelles interactions que les conducteurs seront amenés à avoir avec les véhicules équipés de systèmes de contrôle et d'aide à la conduite nécessitent une information précise sur leur utilisation.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	2
Problématique	4
I Objet de l'étude	4
II Objectifs de l'étude.....	8
Expérimentation	10
III Méthodologie.....	10
III.1 Simulateur de conduite	10
III.2 Simulation du mode de conduite autonome	11
III.3 Sujets	13
IV Protocole	15
IV.1 Parcours autoroutier	15
IV.2 Descriptions des scénarii.....	17
IV.2.1 Scénario 1 : Reprise en main en situation d'urgence	17
IV.2.2 Scénario 2 : Désactivation du mode autonome par « décision » du véhicule.....	19
IV.1 Performances de conduite	21
IV.2 Variables secondaires étudiées.....	24
IV.2.1 L'hypovigilance.....	24
IV.2.2 Distraction vs monotone :.....	25
IV.2.3 Niveau de confiance dans les systèmes de contrôle des véhicules :.....	25
IV.3 Conditions expérimentales.....	26
Résultats	28
I Analyses statistiques.....	28
II Données de conduite	29
II.1 Action prioritaire.....	29
II.2 Taux de collision	30
III Analyse du contrôle du véhicule par le sujet.....	31
III.1 Scenario 1 : le temps de réaction	31
III.2 Scenario 2 : le temps de réaction, le déport maximal & le temps de reprise en main	34
III.2.1 Le temps de réaction.....	34
III.2.2 Le déport maximal.....	34
III.2.3 Temps de reprise en main	35
IV Mesures de l'hypovigilance.....	39
IV.1 Échelle de mesure de la somnolence Karolinska	39
IV.2 Puissance des ondes alpha.....	40
V Analyses corrélationnelles	42
Conclusion	45

PROBLÉMATIQUE

I Objet de l'étude

Les voitures autonomes ne relèvent désormais plus d'une idée futuriste. Des constructeurs tels que Mercedes, BMW et Tesla commercialisent déjà des véhicules avec divers systèmes de contrôle (vitesse, trajectoire). Ces systèmes de contrôle sont à distinguer des systèmes d'aide à la conduite. Les premiers confèrent une autonomie au véhicule, c'est-à-dire ne nécessitant pas l'intervention du conducteur. Un exemple est le système de détection d'obstacles suivi d'un freinage automatique d'urgence si le conducteur ne réagit pas assez rapidement. Le contrôle de la trajectoire à très faible allure sans intervention du conducteur, dans les embouteillages, entre également dans cette catégorie. Les systèmes d'aide à la conduite, quant à eux, assistent le conducteur dans une action précise pour optimiser le contrôle du véhicule. Ainsi, le système d'aide au freinage d'urgence augmente la pression de freinage lorsqu'il détecte un passage anormalement rapide de la pédale d'accélérateur à la pédale de frein.

Enjeu économique

La déclaration du Chancelier de l'Echiquier, George Osborne, montre que les pouvoirs publics ont pleinement pris conscience de l'enjeu économique que représentent les voitures autonomes : « les voitures autonomes pourraient être le changement le plus important depuis l'invention du moteur à combustion interne ». L'industrie automobile en a bien pris conscience et s'est lancée dans la course depuis plusieurs années. La plupart des états d'Amérique du nord travaillent à l'amendement ou ont déjà amendé leur législation routière pour permettre aux constructeurs de procéder à des tests sur route. La convention de Vienne qui régule la circulation routière européenne depuis 1968 a également été modifiée dans ce sens le 23 mars 2016. Le gouvernement britannique, qui n'a pas signé la convention de Vienne, a déjà ouvert ses routes secondaires aux voitures autonomes et devrait autoriser les tests sur les autoroutes et routes principales du Royaume Uni dès 2017.

Objectif 2020

Les constructeurs les plus avancés dans la recherche et le développement de la voiture autonome se disent prêts pour une commercialisation en 2020. Volvo avec son programme « Drive me », a déjà 50 véhicules autonomes en test sur les routes de Göteborg, fief de sa marque. Nissan a immatriculé sa Leaf autonome en 2013. Mais d'autres constructeurs proposent déjà des systèmes de conduite semi-autonome et se disent prêts pour le tout autonome en 2020 (Mercedes, Audi, Cadillac, Tesla, BMW, ...). Toutefois, il ne fait pas de doute que la communication de la

part de ces marques sur leurs avancées technologiques répond également à un objectif publicitaire du moment. Et il va sans dire que la transition vers le tout autonome prendra plusieurs années, voire plusieurs décennies.

Sécurité et risques

Bien qu'on imagine aisément que les voitures autonomes vont considérablement renforcer la sécurité de leurs conducteurs et des autres utilisateurs de la route, de nouveaux risques vont inévitablement se présenter. Ces risques concerneront à la fois les conducteurs des voitures autonomes et les personnes dont les véhicules ne seront pas équipés de systèmes d'aide au contrôle. En effet, les constructeurs sont bien conscients que les véhicules autonomes ne seront pas prêts pour gérer toutes les situations qui peuvent se présenter dans une quasi-infinité d'environnements différents. La Google Car a parcouru plus de 2 millions de kilomètres depuis 2009 sans être parvenue à une « connaissance » exhaustive des situations routières. En effet, il est important de comprendre que les systèmes de contrôle ne sont pas de simples ordinateurs programmés à l'aide d'algorithmes. Ces systèmes « apprennent » leur environnement et les « comportements » de conduite à adopter par essais et erreurs, sur la base de réseaux de neurones formels (ou réseaux connexionnistes). Par conséquent, dans un premier temps, jusqu'à arriver à un taux d'erreurs négligeable et/ou significativement inférieur à celui des humains, la vigilance des conducteurs sera nécessairement requise pour pouvoir reprendre le contrôle en cas de situation non ou mal gérée par le véhicule. Dans cette optique, l'État de Californie, qui était pourtant l'un des premiers à autoriser les essais sur ses routes principales, a fait marche arrière en durcissant ses conditions. Il est allé jusqu'à exiger que les conducteurs de voitures autonomes bénéficient d'une formation spéciale pour reprendre le contrôle de leur véhicule. L'amendement qu'a apporté la commission économique pour l'Europe des Nations Unies (Unece) à la Convention de Vienne impose également un contrôle au conducteur : « Les systèmes de conduite automatisée seront explicitement autorisés sur les routes, à condition qu'ils soient conformes aux règlements des Nations unies [ONU] sur les véhicules, ou qu'ils puissent être contrôlés voire désactivés par le conducteur ».

Se pose alors la question de la capacité des conducteurs à réagir de manière appropriée à de telles situations. Bien que des systèmes d'alertes sont prévus et existent déjà pour signaler au conducteur que le contrôle lui est rendu, aucune étude n'a jusqu'ici tenté de montrer si, d'une part, les conducteurs sont aptes à gérer une quantité croissante de signaux d'alerte et, d'autre part, si les conducteurs sont capables de reprendre le contrôle en toute sécurité ?

Niveaux d'autonomie

La plupart des 'voitures autonomes' actuelles n'exemptent pas entièrement le conducteur des missions qui lui sont habituellement dévolues. Il existe 2 référentiels pour classer les niveaux d'autonomie d'un véhicule :

- **le barème de l'agence la NHTSA** (National Highway Traffic Safety Administration). Ce barème qualifie le niveau (de 0 à 4) de prise en charge de la conduite par les logiciels de pilotage automatique des véhicules.
- **le barème, en Europe, de l'OICA** (Organisation Internationale des Constructeurs Automobiles) à 6 échelons :

Autonomie de Niveau 0

C'est le niveau le plus simple à appréhender, celui dans lequel tout est manuel. Dans le cas d'une autonomie de niveau 0, le conducteur a le contrôle total et exclusif des fonctions primaires du véhicule (les freins, la direction, l'accélération et la force motrice), et ce à tout instant.

Même si le conducteur fait tout par ses propres moyens et qu'aucune des fonctions principales n'est automatisée, le chauffeur peut toutefois disposer de mécanismes d'avertissement, comme le signal sonore de franchissement de ligne, etc.

⇒ Exemple d'assistance de Niveau 0 : le radar de recul.

Autonomie de Niveau 1

Dans le cadre d'une autonomie de Niveau 1, le conducteur peut momentanément confier au véhicule une tâche de conduite à condition que la voiture ne prenne en charge que l'une des deux dimensions (longitudinale ou transversale) du guidage.

Avec un régulateur de vitesse adaptatif (Adaptative Cruise Control) par exemple, le véhicule prend en charge la dimension longitudinale –l'accélération– mais laisse au chauffeur la responsabilité de se positionner dans la voie de circulation la plus adaptée (dimension transversale).

En Niveau 1, la responsabilité des manœuvres est en permanence conservée par l'humain, qui délègue une partie des tâches au système, et qui se doit d'être capable de reprendre le contrôle total du véhicule sur la conduite si la situation l'exige.

⇒ Exemple d'assistance de Niveau 1 : le régulateur adaptatif

Autonomie de Niveau 2

Le niveau 2 marque la limite juridique actuelle, pour laquelle il n'est pas encore possible de transférer la responsabilité à une

machine... même si sa fiabilité est supérieure aux décisions humaines.

Au niveau 2, on peut considérer que le conducteur n'intervient dans la conduite qu'en mode Supervision. La fonction Park Assist est un bon exemple du Niveau 2, puisque la voiture gère seule tous les paramètres de guidage sous la supervision du conducteur, qui a la possibilité d'intervenir pour reprendre la main sur la trajectoire à tout instant.

En cas d'accident, le conducteur est entièrement responsable du défaut du système, car il n'a pas été suffisamment attentif à son environnement et à manquer à son devoir de supervision. Dans tous les cas, il est important de rappeler que la sécurité de l'ensemble du système est indépendante du niveau d'autonomie.

A ce stade, la moindre action du conducteur prend le pas sur celle de la voiture et ce, quoi qu'il arrive. La responsabilité des manœuvres est en permanence conservée par l'humain, qui se doit d'être capable de reprendre le contrôle total sur la conduite si la situation l'exige.

⇒ Exemple de Niveau 2 : l'assistance au stationnement

Autonomie de Niveau 3

A ce stade, l'humain peut déléguer une partie de sa conduite sur les 2 dimensions de guidage et abaisser son niveau de vigilance pour se consacrer à d'autres tâches de manière brève. En revanche, il doit être en mesure de reprendre le contrôle de la conduite si les conditions l'exigent. Le système de la voiture autonome se charge alors de positionner et maintenir le véhicule sur sa voie tout en conservant une allure adaptée aux conditions de trafic et à la vitesse des autres automobiles. Un bon exemple du Niveau 3 peut être la fonction de maintien dans la voie dans les bouchons. On peut lire son journal sans prêter trop d'attention aux embouteillages. Mais lorsque ces derniers se dissipent, la voiture sollicite la reprise en main du chauffeur. A ce stade, le niveau technique est identique au niveau 2, mais la responsabilité est transférée momentanément au système dans les phases de conduite autonome.

⇒ Exemple d'autonomie de niveau 3 : conduite basse-vitesse dans les embouteillages

Autonomie de Niveau 4

Le niveau 4 d'autonomie d'un véhicule se caractérise par une capacité de la voiture à prendre le pas sur l'humain dans un certain nombre de cas précis. L'autonomie de niveau 4 est quasiment complète dans le cadre de fonctions spécifiques comme

le Valet Parking. Dans ces cas-là, le système prend en charge l'ensemble des fonctions de manière autonome sans même nécessiter la présence du chauffeur, et porte la responsabilité des manœuvres. En revanche, c'est toujours le conducteur qui active et désactive le système de prise en charge.

Exemple du Niveau 4 => Valet Parking, système qui permet au véhicule de se garer ou de venir chercher le chauffeur.

Autonomie de Niveau 5

Ce niveau d'autonomie n'existe que dans le système européen – même s'il n'a pas de valeur normative– et consiste en un système doué de capacités de conduite autonome totale et permanente, dans lequel l'humain n'intervient à aucun moment sinon pour indiquer sa destination et se laisser transporter. Ce niveau d'autonomie se distingue du niveau précédent par la 'certitude machine', une notion permettant au système de ne pas exécuter un ordre de l'humain, si celui-ci est considéré comme anormal, inconsideré ou dangereux, ou de prendre une initiative basée sur les mesures de ses capteurs.

Dans un certain nombre de cas, les systèmes de l'automobile peuvent donc pratiquer une manœuvre non sollicitée par le conducteur ou même refuser d'exécuter un mouvement qui mettrait en péril le véhicule ou ses passagers (ex : ouvrir la portière sur autoroute).

⇒ Exemple de Niveau 5 : la Google Car conduit seule, sans volant ni pédales.

II Objectifs de l'étude

S'il faut bien considérer que les niveaux d'autonomie d'un véhicule se basent avant tout sur le partage de responsabilité, il est important de rappeler que les 3 premiers niveaux d'autonomie proposée par de l'OICA, n'impliquent pas de responsabilité de la voiture, et qu'il s'agit ni plus ni moins que d'aides à la conduite. L'objectif de la présente étude est donc de se limiter à l'exploration des comportements de conduite lors d'utilisation de systèmes classés à un niveau 3 et inférieur.

- **Contrôle longitudinal**

L'ACC (Adaptive Cruise control) est un régulateur de vitesse adaptatif. Il est installé en série sur la majorité des véhicules premium, et en option sur un nombre croissant de modèles de véhicules. Bien que depuis sa mise sur le marché, en 2008, il ait bénéficié de constantes améliorations tant au niveau de sa précision que de sa fiabilité, il peut, dans certaines situations, entraîner un « comportement inadapté » du véhicule. En effet, des témoignages d'utilisateurs rapportent que

lorsque le véhicule suivi ralentit puis sort du champ de détection de l'ACC (e.g., en changeant de voie sur l'autoroute ou en changeant de direction sur une route secondaire), l'ACC commence par ralentir le véhicule pour garder sa distance de sécurité puis accélère pour reprendre la vitesse de consigne parce qu'il ne détecte plus la présence d'un véhicule. **C'est ce type de scénario que nous proposons d'étudier sur un parcours autoroutier où le véhicule suivi peut changer brusquement de voie en raison d'une zone de travaux qui, elle, représente un obstacle que l'ACC ne détecte pas.**

- **Contrôle transversal**

Dans son mode passif, le contrôle transversal de trajectoire avertit le conducteur d'un franchissement de ligne si le clignotant n'a pas été actionné préalablement. Dans son mode actif, le système contrôle la trajectoire du véhicule sans que le conducteur n'ait besoin d'actionner le volant. Lorsque le système n'est plus en mesure d'assurer le contrôle (absence ou mauvais marquage au sol), le conducteur est averti que le contrôle lui est rendu. Ce système actif n'est aujourd'hui utilisable qu'à une vitesse inférieure à 50 Km/h. **Nous testons dans la présente étude les réactions des conducteurs à une perte de trajectoire (après avertissement) dans des conditions similaires de vitesse.**

- **Confiance/vigilance du conducteur**

Nous avons également évalué dans la présente étude la confiance des conducteurs dans les systèmes de contrôle, ainsi que l'impact que cette confiance peut avoir sur leur vigilance et, par conséquent, sur leur réaction lors de la reprise en main du véhicule.

EXPÉRIMENTATION

III Méthodologie

III.1 Simulateur de conduite

Les expériences ont été réalisées sur le simulateur de conduite du CI2N (figure 1). Le simulateur de conduite se présente sous la forme d'un habitacle automobile placé sur une plate-forme mobile à 4 degrés de liberté (mouvements longitudinal, vertical, roulis et tangage de l'habitacle), associée à une unité de visualisation interactive en temps réel. L'unité de visualisation reproduit dans de très bonnes conditions de vision et sur 360°, un réseau routier ou autoroutier sous forme d'images de synthèse simulant les conditions diurnes, les conditions nocturnes ou les conditions de conduite dans le brouillard. Le système d'acquisition d'images vidéo comprend deux caméras infra-rouge (caméra JMC - CCD 906), filmant les comportements gestuels et faciaux du conducteur, ainsi que ses mouvements oculaires (Smart-Eye ®). Des moniteurs en salle de contrôle permettent de visualiser simultanément les deux vues du conducteur, la route projetée sur les écrans du simulateur, ainsi que les variables électrophysiologiques (électroencéphalogramme, électro-oculogramme, électromyogramme, électrocardiogramme) enregistrées en temps réel. Les enregistrements physiologiques du conducteur sont visualisés en temps réel à partir du poste de contrôle.

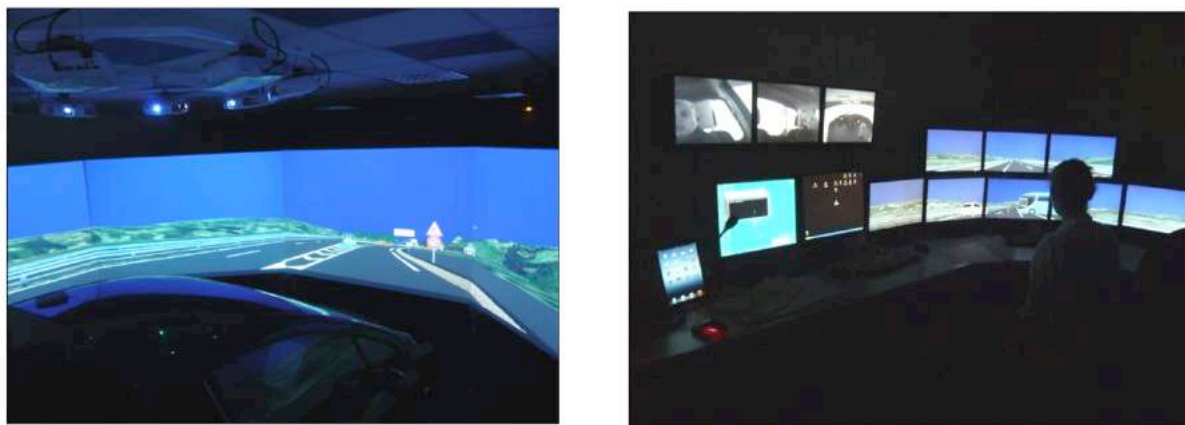


Figure 1 : **Gauche :** Habitacle du simulateur du CI2N, et l'unité de visualisation reproduisant un environnement routier à 360° autour de l'habitacle. **Droite :** Salle de contrôle permettant de visualiser simultanément les comportements du conducteur dans l'habitacle, la route projetée sur les écrans du simulateur, ainsi que les variables électrophysiologiques enregistrées en temps réel.

III.2 Simulation du mode de conduite autonome

Nous avons opté pour un mode couplé entre le contrôle transversal et longitudinal. Ainsi, lorsque le participant actionne un bouton situé sur le commodo gauche, le simulateur entre à la fois en mode autonome de régulation transversal et longitudinal si bien que le participant n'ait plus aucune action à accomplir pour la conduite du simulateur. L'activation du mode autonome est confirmée par un signal sonore caractéristique et un écran au centre du tableau de bord affiche « Mode Autonome » (Figure 2).

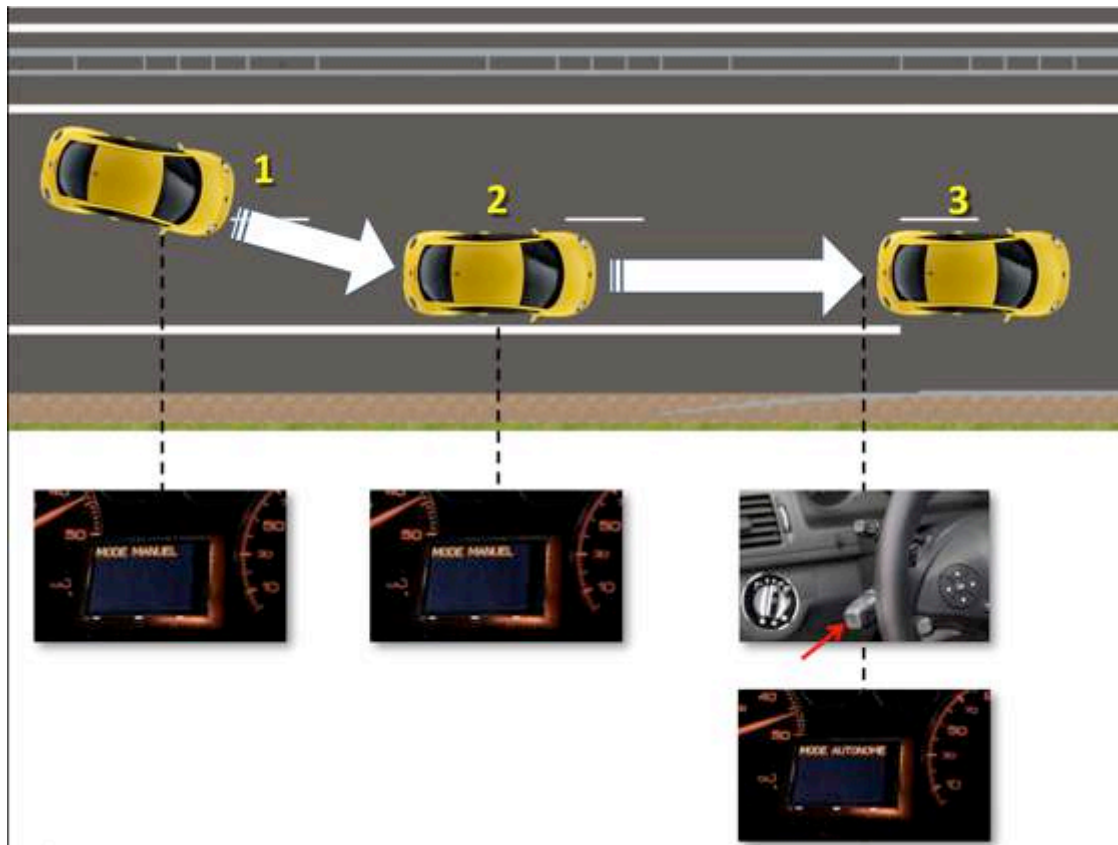


Figure 2 : Activation du mode autonome du simulateur de conduite. (1) Le véhicule est en mode manuel, l'information est indiquée sur le tableau de bord. (2) Le conducteur doit positionner le véhicule sur l'axe central de la voie de gauche ou de droite et atteindre une vitesse de conduite adaptée (e.g. 130 km/h), avant (3) d'activer le mode de conduite autonome par un appui sur le commodo se situant à gauche de son volant.

- **Contrôle longitudinal :**

Le système permet de maintenir une distance de sécurité entre le simulateur et les véhicules suivis, qui varie en fonction de la vitesse des véhicules. En effet, cette distance de sécurité correspond à la distance parcourue par le véhicule durant 2 secondes (Figure 3). Lorsque le véhicule suivi ralentit, le simulateur ralentit par décélération pour conserver cette distance de sécurité. Le simulateur peut freiner

en cas de ralentissement fort du véhicule suivi mais ce scénario n'a pas été prévu dans cette étude.

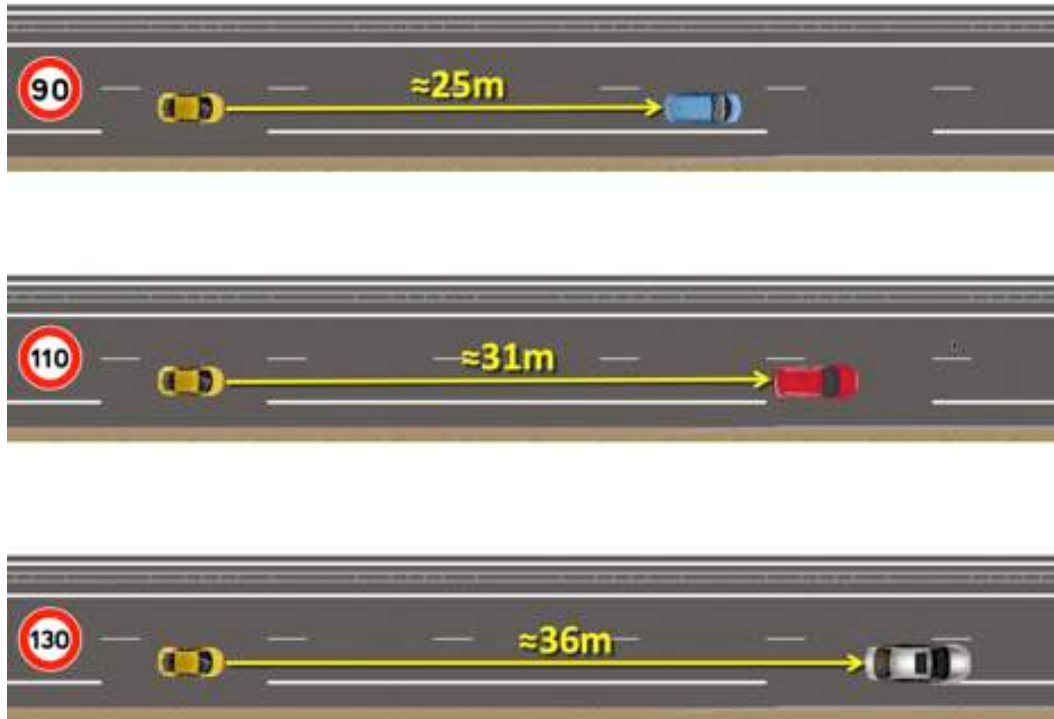


Figure 3 : Le mode autonome du simulateur de conduite permet un contrôle transversal et longitudinal du véhicule. Le contrôle longitudinal se traduit par le maintien d'une distance de sécurité entre le simulateur et le véhicule suivi. Cette distance de sécurité varie en fonction de la vitesse des véhicules. Ces distances sont indiquées ici selon que la vitesse est de 90, 110 ou 130 km/h.

- **Contrôle transversal :**

Le simulateur a été programmé pour toujours rester sur l'axe central de la voie sur laquelle le mode autonome a été activé (droite ou gauche sur le parcours autoroutier). Il ne change pas de voie pour dépasser un véhicule. Cette action doit être accomplie par le conducteur en passant en mode manuel. Pour une immersion et un réalisme de conduite optimaux, l'angle volant est contrôlé si bien que le participant peut voir le volant tourner dans les courbes.

- **Désactivation du mode autonome :**

Le retour en mode manuel peut se faire de quatre manières :

- Appui sur le bouton activation/désactivation situé sur le commodo de gauche
- Action sur le volant
- Appui sur la pédale de frein
- Appui sur la pédale d'accélérateur

Un son caractéristique, différent de celui de l'activation du mode autonome, informe le conducteur que le simulateur est de nouveau en mode manuel. L'afficheur indique « Mode Manuel ».

Dans la plupart des véhicules qui disposent du contrôle transversal et longitudinal, ces deux modes peuvent se désactiver indépendamment l'un de l'autre. Dans la présente étude, nous avons opté pour une désactivation conjointe des deux modes, afin de faciliter l'apprentissage de l'utilisation du système par les participants. En effet, les pré-tests ont montré que les sujets avaient des difficultés à se familiariser avec un système à contrôles indépendants. De plus, les tests ont montré que la reprise en main était plus aisée lorsque la désactivation était totale que lorsqu'elle ne se faisait que pour un seul type de contrôle.

- **Durée du mode autonome :**

Bien qu'à l'heure actuelle la conduite autonome des véhicules équipés est limitée de quelques secondes à un maximum de 2 minutes avant de se désactiver automatiquement, notre simulateur propose un mode autonome qui peut rester actif sur la totalité du parcours de 110 km. Le but est de permettre aux participants de se familiariser au maximum avec la conduite autonome pour que les éventuels défauts de réaction lors de la reprise en main ne soient pas entièrement imputables à une méconnaissance du système.

III.3 Sujets

Nous avons recruté 60 sujets pour cette expérience, répartis en 3 groupes d'âge : 20 sujets âgés entre 20 et 30 ans constitués le groupe « jeunes », 20 sujets âgés entre 40 et 50 ans le groupe « quadragénaires », et 20 sujets âgés de plus de 60 ans composés le groupe « seniors » (tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques des sujets pour les 3 groupes ayant participé à l'étude. Les valeurs indiquées entre parenthèses correspondent aux écarts-types.

Groupes de Sujets	N	Âge moyen	Ratio Hommes / Femmes	Nombre moyen d'années d'étude	Nombre moyen de Km par an réalisés en voiture
Sujets jeunes	20	24,13 (±2,45)	10/10	12,62 (±3,44)	11866 (±7802)
Quadragénaires	20	48,29	10/10	10,58	9936

		(±3,10)		(±4,05)	(±8425)
Seniors	20	68,08 (±3,48)	10/10	11,37 (±3,98)	11460 (±7429)

Les sujets arrivaient au laboratoire en bonne condition physique et ayant satisfait aux conditions suivantes : pas de prise de médicaments, de privations de sommeil, d'exercices physiques intensifs la veille de l'expérience, ainsi que de prise d'alcool durant les 48 heures précédant l'expérience. La prise alimentaire avant la passation devait être située à un intervalle d'une heure et demie minimum. Les sujets étaient tous titulaires du permis de conduire B.

Les sujets recevaient une information sur l'objectif de l'expérience, ainsi que sur son déroulement, et signaient un consentement éclairé. Une visite médicale préalable à la passation de l'expérience, permettait de s'assurer que les sujets répondaient aux critères d'inclusion de l'expérience et ne présentaient pas de critère d'exclusion.

Les critères d'inclusion au protocole étaient les suivants :

- Sujets de sexe masculin ou féminin.
- Taille et poids standards (1,68 à 1,85 m et 66 à 85 kg).
- Âgés de plus de 18 ans.
- Bonne condition physique.
- Bonne santé : absence de pathologie, de troubles cognitifs, ou de contre-indication à cette recherche.
- Titulaire du permis de conduire B et parcourir au moins 5000 km par an.

Les critères d'exclusion au protocole sont les suivants :

- Consommation d'amphétamines, benzodiazépines, barbituriques, cannabis, cocaïne et opiacées.
- Consommation d'alcool excédant 20g d'alcool par jour.
- Consommation de café excédant 5 tasses par jour (ou boissons équivalentes contenant de la xanthine).
- Consommation quotidienne de plus de 9 cigarettes.
- Être mineur.
- Être sous sauvegarde de justice.
- Les personnes n'étant pas en état de donner leur consentement.

Après cette visite médicale préalable à la participation à l'expérience, les sujets étaient soumis à une phase de familiarisation avec la conduite du simulateur sur une période de 20 minutes. Durant cette phase d'habituation, les sujets conduisaient eux-mêmes le simulateur. L'objectif était de s'assurer que la personne n'était pas sujette au mal du simulateur.

A l'issue de cette phase de familiarisation, l'expérimentateur présentait au sujet le mode de fonctionnement du mode de conduite autonome du simulateur. En conduisant le véhicule sur une portion d'autoroute, le sujet était exercé à activer et désactiver le mode de conduite autonome, afin de se familiariser avec le fonctionnement du système. Après cette phase de familiarisation, le sujet pouvait réaliser l'expérimentation.

IV Protocole

IV.1 Parcours autoroutier

Lors de l'expérience dans le simulateur de conduite, les sujets devaient réaliser un parcours autoroutier de 53 km (Figure 4). Les sujets débutaient ce parcours sur une aire d'autoroute, le véhicule garé sur une place de parking. Ils devaient rejoindre la voie autoroutière avec pour consigne de respecter les panneaux de signalisation indiquant les limitations de vitesse (e.g. 110 et 130 km/h) et assurer une conduite respectant les autres véhicules. Le trafic sur le parcours était modéré, à raison de 2 véhicules par kilomètre, et était composé à 80% de véhicules légers et à 20% de poids lourds. Lors des 10 premiers kilomètres, les sujets conduisaient le véhicule sans activation du système autonome.

Au 10^{ème} km, les conducteurs devaient activer le système de conduite autonome. Les sujets avaient alors pour tâche de maintenir ce mode activé en permanence, et de ne reprendre la main sur le véhicule que s'ils estimaient que la situation sur la route le nécessitait. Lors de ce parcours en conduite autonome, deux scénarii survenaient aux km 23 et 43, avec respectivement une défaillance et une désactivation du système de conduite autonome.

Lors de l'expérience, le sujet était seul dans le simulateur. L'expérimentateur était dans la salle de contrôle, adjacente à celle du simulateur. Les communications entre le sujet et l'expérimentateur étaient assurées à l'aide de haut-parleurs et de microphones disposés dans l'habitacle du véhicule et dans la salle de contrôle.

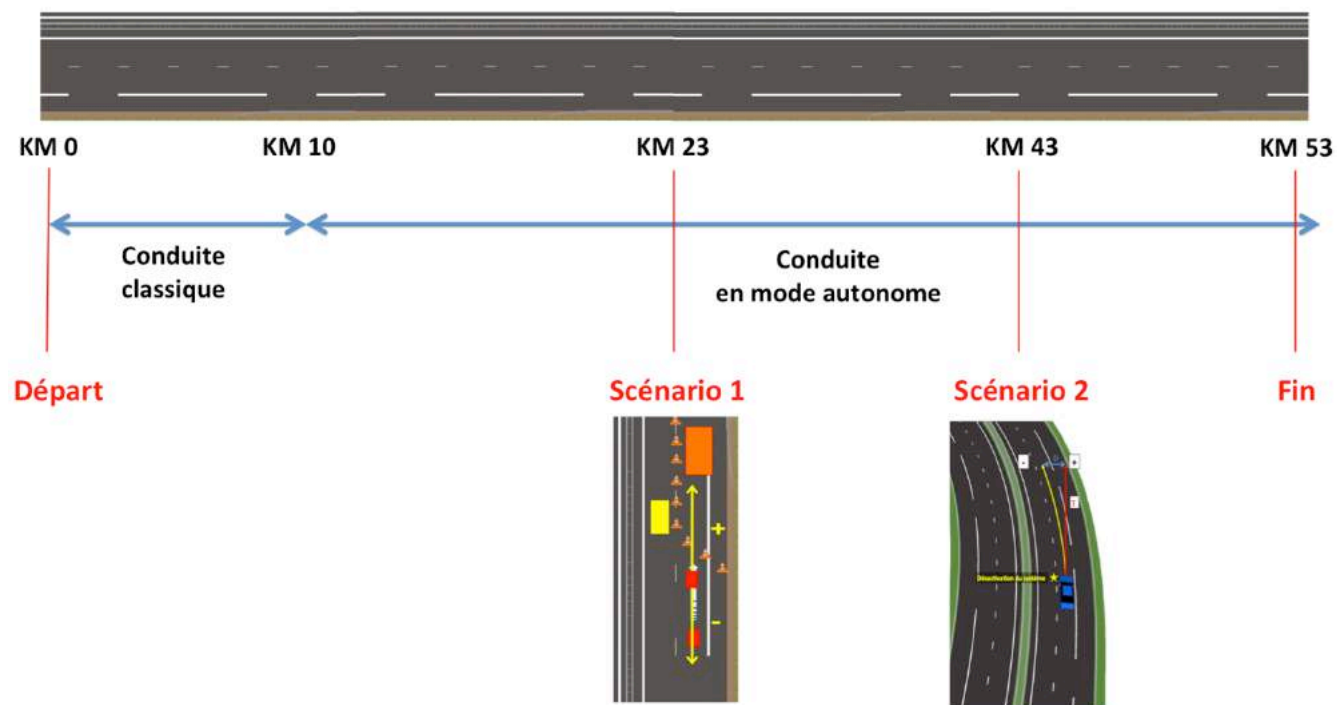


Figure 4 : Schéma du parcours autoroutier de 53 km réalisé par les sujets lors de l'expérience dans le simulateur de conduite. Lors des 10 premiers kilomètres, les sujets conduisaient le véhicule sans activation du système autonome. Au 10ème km, les conducteurs activaient le système de conduite autonome. Lors de ce parcours en conduite autonome, deux scénarii survenaient aux km 23 et 43, avec respectivement une défaillance et une désactivation du système de conduite autonome.

IV.2 Descriptions des scénarii

IV.2.1 Scénario 1 : Reprise en main en situation d'urgence

Dans ce premier scénario, une situation de défaillance de détection d'un objet par le système autonome simulée. La situation proposée correspond à une non détection par le système de la présence de cônes de signalisation de chantier. Cette simulation ne présage en rien de la capacité des véhicules dotés de systèmes autonomes à détecter ou non ce type d'obstacle. Il est au contraire, même fort probable que les systèmes autonomes détectent ce type d'obstacle lorsqu'il se trouve au milieu de la voie.

Lors de ce scénario, le véhicule du sujet est en mode de conduite autonome, sur la voie de droite. La vitesse limitée sur cette portion d'autoroute est de 110 km/h. Devant le véhicule se situe un poids lourd. Ce poids lourd se déporte sur la voie de gauche en raison de la présence d'une zone de chantier sur la voie de droite, délimitée par des cônes. Un véhicule de chantier à l'arrêt se situe dans cette zone. Le sujet se trouve alors face à cette zone de chantier, le système de conduite autonome ne détectant pas la présence des plots : il s'agit ainsi pour le sujet d'agir sur le véhicule fin d'en reprendre le contrôle et d'éviter la collision avec les plots et le véhicule de chantier. L'objectif de ce scénario était d'essayer de voir si le conducteur se rend compte suffisamment tôt que le véhicule ne détecte pas un obstacle, quel qu'il soit, pour pouvoir agir au mieux sur le véhicule (figure 5).

Nous avons distingué au sein de ce scénario deux conditions de déport du poids lourd suivi par le véhicule du sujet. Pour la moitié des participants, le véhicule se trouvant devant le simulateur se déportait sur la voie de gauche à 100m du premier plot, alors que pour l'autre moitié des sujets, cette distance était réduite à 66m. La distance de sécurité à 110km/h, vitesse du véhicule du sujet lors de ce scénario, est de 66m.

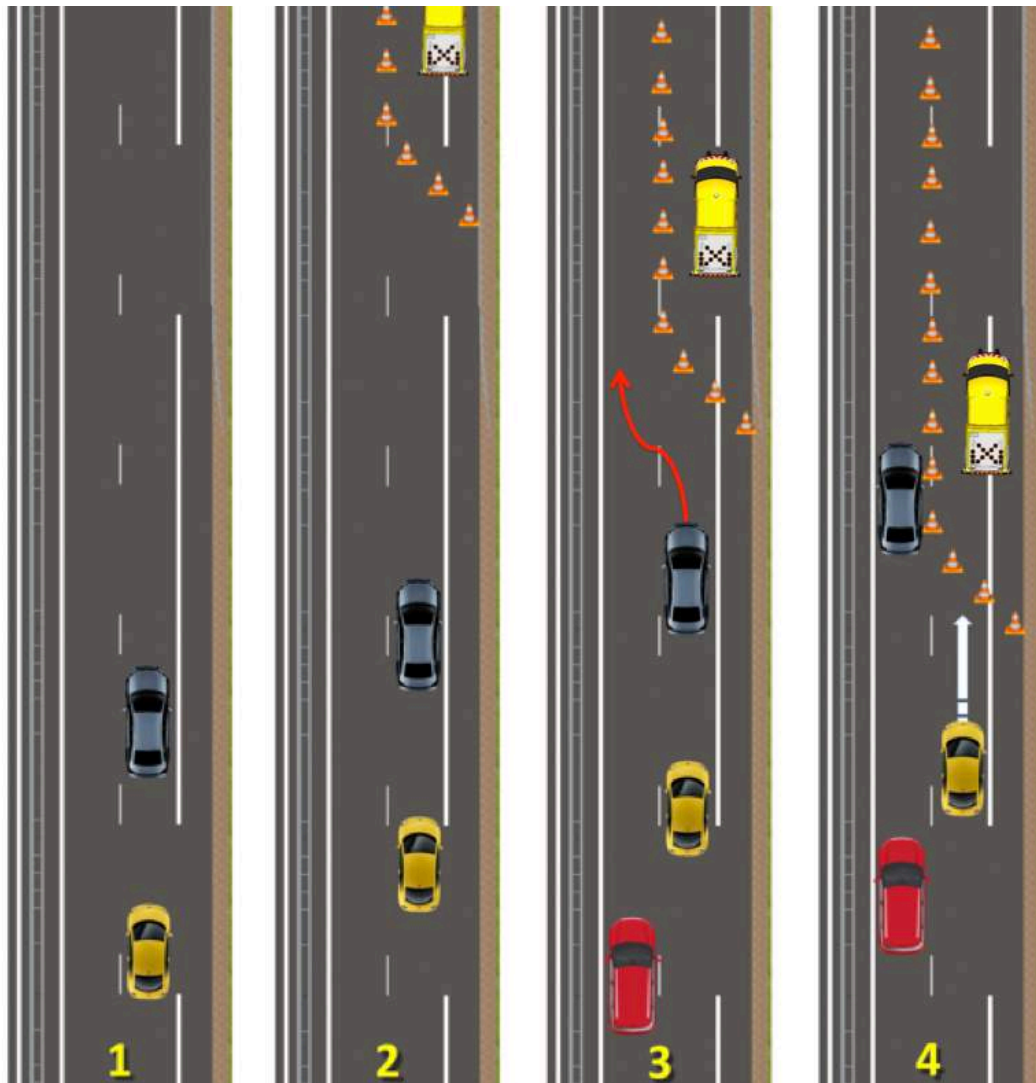


Figure 5 : Scénario 1, nécessitant une reprise en main du véhicule en situation d'urgence. (1) le véhicule du simulateur (voiture jaune) suit un véhicule (voiture grise) sur une ligne droite. (2) Les véhicules approchent une zone de travaux. Cette zone est délimitée par des plots et un véhicule de chantier s'y trouve à l'arrêt. Les plots sur la voie de droite incitent les conducteurs à emprunter la voie de gauche. Le conducteur à bord du simulateur ne peut voir ces plots, le véhicule qu'il suit lui masquant ces éléments. (3) Un troisième véhicule (voiture rouge) circule sur la voie de gauche et s'apprête à dépasser le véhicule du simulateur. Le véhicule suivi (voiture grise) réalise un déboisement sur la voie de gauche. Le conducteur du simulateur peut désormais voir les plots de chantier. Pour la moitié des participants, le véhicule se trouvant devant le simulateur se déporte sur la voie de gauche à 100m du premier plot, alors que pour l'autre moitié des sujets, cette distance est réduite à 66m. (4) Le véhicule du simulateur continue sa progression en mode autonome. Le système est défaillant car il ne détecte pas les plots. Le sujet se doit d'agir dans cette situation d'urgence.

IV.2.2 Scénario 2 : Désactivation du mode autonome par « décision » du véhicule.

Dans ce second scénario, une désactivation du mode autonome par « décision » du véhicule a été simulée. Ce type de situation est courant sur l'ensemble des véhicules qui sont dotés de systèmes de contrôle transversal et longitudinal, soit en raison d'évènements environnementaux (e.g., absence de marquage au sol) soit de manière systématique (durée de conduite autonome limitée de quelques secondes à quelques minutes).

Au 43^{ème} kilomètre, le conducteur était averti de la désactivation par le message « Mode Manuel » sur l'afficheur du tableau de bord et 2 secondes plus tard par signal sonore caractéristique, différent du son associé à l'activation du mode autonome. La désactivation a été programmée sur une trajectoire non rectiligne pour amener le véhicule à dériver progressivement vers la bande d'arrêt d'urgence. (Figure 6).

Le but de ce second scénario était simplement de voir si les gestes de reprises en main du conducteur étaient adaptés ou s'ils pouvaient présenter un caractère inadapté voir accidentogène pour la situation donnée.

Note : L'ordre de présentation des scénarii 1 et 2 a été contrebalancé entre les sujets. Ainsi la moitié des sujets ont d'abord été confronté au scénario 1 puis 2 et l'autre moitié au scénario 2 puis 1. Cette précaution a été prise parce que durant les pré-tests nous avons remarqué qu'après le premier scénario les sujets étaient plus vigilants et anticipaient d'autres situations d'urgence.

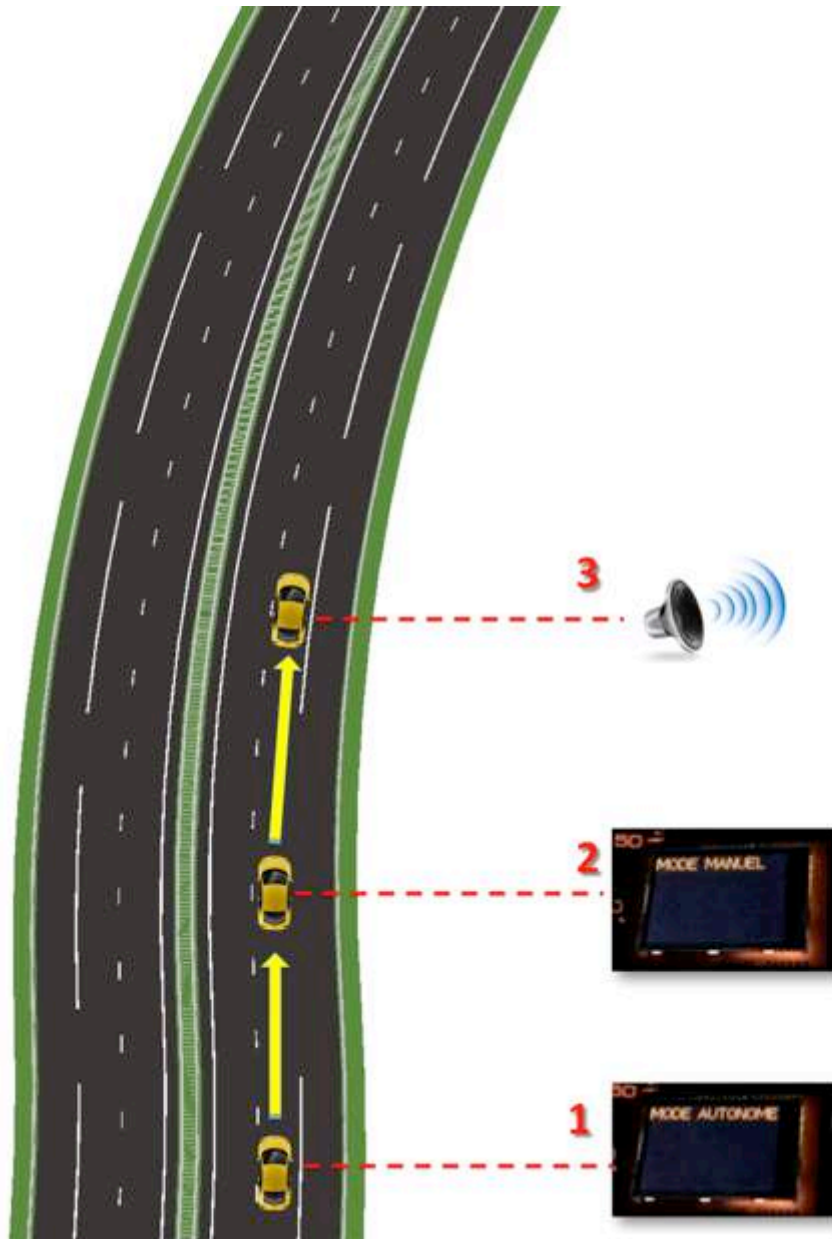


Figure 6 : Scénario 2 simulant une désactivation du mode autonome par « décision » du véhicule. (1) le véhicule est sur une ligne droite de l’autoroute et s’apprête à aborder un virage. Le mode autonome du véhicule est activé. (2) L’absence de marquage sur la droite de la voie induit une désactivation du mode de conduite autonome. Le conducteur est averti sur l’écran de contrôle que le système va passer en mode manuel. (3) Deux secondes après l’avertissement visuel, un signal sonore est émis dans l’habitacle pour avertir le conducteur que le véhicule est en conduite manuel et qu’il doit en assurer le contrôle.

IV.1 Performances de conduite

Les performances de conduite, correspondant à la réaction des conducteurs lors de la survenue des scénarii 1 et 2, ont été estimées par l'étude de plusieurs données enregistrées par le système de simulation :

- **L'action prioritaire** : pour reprendre le contrôle du véhicule, nous avons identifié sur quel élément du véhicule le sujet est intervenu en priorité dans les scénarios 1 et 2 : le volant, la pédale de frein ou l'accélérateur.
- **Le taux de collision** : pour le scénario 1, nous avons calculé le taux de sujet de chaque groupe dont le véhicule est entré en collision avec un des plots de chantier et/ou avec le véhicule de chantier stationné dans la zone délimitée par les plots.
- **La distance de réaction (en m)** : dans le scénario 1, elle correspond à la distance du véhicule par rapport au premier plot de chantier au moment où le sujet agit sur le véhicule (figure 7). Dans le scénario 2, la distance de réaction correspond à la distance parcourue par le simulateur avant que le sujet réagisse en actionnant le volant, la pédale de frein ou l'accélérateur.
- **Le temps de réaction (en s)** : Dans le scénario 2 cette mesure correspond à la durée entre le moment où le système de conduite autonome est désactivé et le moment où le sujet agit sur le véhicule (figure 8). Dans le scénario 1 cette mesure correspond à la durée entre le moment où le sujet peut percevoir pour la première fois l'obstacle et le moment où il agit sur le véhicule.
- **Déport maximal (en m)** : dans le scénario 2, la désactivation du système de conduite autonome avait lieu quelques mètres avant l'entrée dans une trajectoire courbe. Ainsi, sans action du sujet sur le véhicule, la voiture se déportait de l'axe principal de la route. Le déport maximal correspond ainsi à la distance maximale atteinte entre la position du véhicule après désactivation du système de conduite autonome, et l'axe central de la voie (figure 8). Plus cette distance était élevée, plus le risque d'accident était élevé, le véhicule se rapprochant du rail de sécurité.
- **Temps de reprise en main (en s)** : pour le scénario 2, le temps de reprise en main correspond à la durée entre le moment où le sujet agit sur le véhicule après la désactivation du système (temps de réaction) et le moment où le véhicule atteint le déport maximal et engage la bonne manœuvre pour ramener le véhicule au centre de la voie. Cette différence correspond ainsi au temps nécessaire pour le sujet de corriger la trajectoire du véhicule après avoir repris son contrôle.

Pour le scénario 1, Les paramètres de conduite mesurés ont également été comparés à une condition contrôle d'une étude antérieure réalisée par le CI2N et comportant le même scénario (Étude Régulateur/ limiteur de vitesse, Fondation Vinci Autoroute). Pour le scénario 2, une condition contrôle de conduite manuelle ne pouvant de toute évidence pas être élaborée pour ce scénario, les temps de réaction ont été rapportés à des études antérieures menées au CI2N, ainsi qu'à des normes de la littérature scientifique.

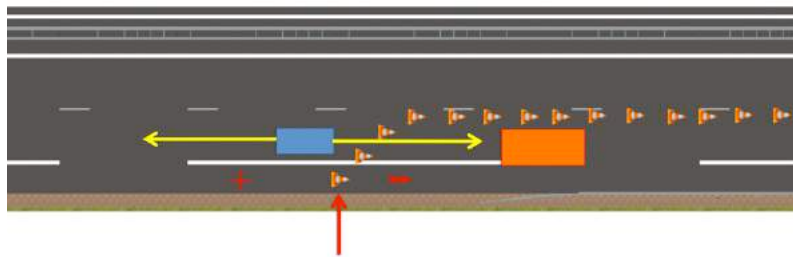


Figure 7 : schéma de l'évaluation de la performance de conduite du sujet dans le scénario 1. Sur ce schéma, le sens de la circulation est de la gauche vers la droite. Le véhicule du sujet (en bleu) arrive sur la zone de travaux délimitée par des plots. Un camion (en orange) est stationné sur la voie. Le système de conduite autonome ne détecte pas la présence des plots sur la voie et le sujet doit agir pour reprendre le contrôle du véhicule. Afin d'évaluer la réactivité du conducteur, nous avons calculé la distance du véhicule par rapport au premier plot de chantier (flèche rouge) au moment où le sujet agit sur le véhicule. Cette distance de réaction a une valeur positive ou négative, selon que le sujet agisse respectivement avant ou après le 1^{er} plot de la zone de chantier.

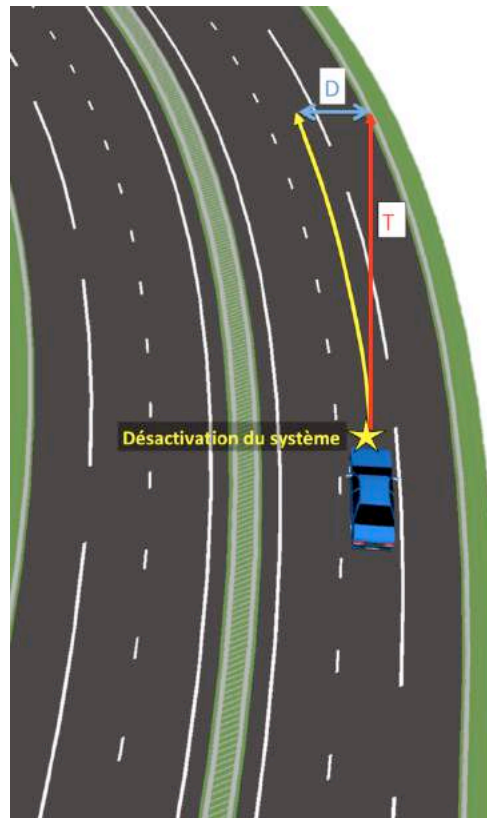


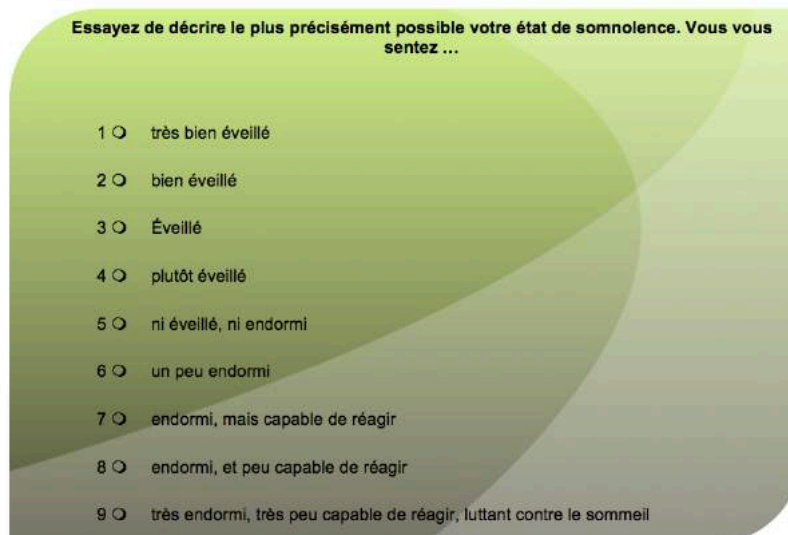
Figure 8 : schéma de l'évaluation de la performance de conduite du sujet dans le scenario 1. La désactivation du système de conduite autonome a lieu quelques mètres avant que le trajet emprunte une courbe. Sans action du sujet sur le véhicule, la voiture se déporte de l'axe principal de la voie (flèche rouge). Le déport maximal correspond ainsi à la distance maximale (D, flèche bleue) atteinte entre la position du véhicule après désactivation du système de conduite autonome, et l'axe central de la route. Nous avons également calculé le temps de réaction (T) correspondant au moment où le conducteur a agi sur le véhicule après la désactivation du système de conduite autonome.

IV.2 Variables secondaires étudiées

IV.2.1 L'hypovigilance

Dès les 10 premières minutes de conduite sur le simulateur, les sujets montraient des signes d'hypovigilance, tels que des clignements fréquents des yeux ou des bâillements. Afin d'objectiver ces observations et d'étudier l'éventuelle influence de l'automatisation de la conduite sur le délai d'entrée en hypovigilance nous avons enregistré 3 paramètres au cours de l'expérience :

- Les mouvements oculaires (en continu)
- L'activité électroencéphalographique (EEG) pour mesure des ondes alpha (en continu), dont l'augmentation de l'activité est un marqueur de l'hypovigilance.
- L'auto-évaluation du sujet de son état d'éveil : cette évaluation a été réalisée par le sujet lors de l'expérience par l'échelle de mesure de la somnolence Karolinska (figure 9). Le sujet était interrogé par l'expérimentateur avant et après l'épreuve de conduite, ainsi qu'avant et après chaque scénario, aux km 20, 24, 40 et 44.



Essayez de décrire le plus précisément possible votre état de somnolence. Vous vous sentez ...

- 1 très bien éveillé
- 2 bien éveillé
- 3 Éveillé
- 4 plutôt éveillé
- 5 ni éveillé, ni endormi
- 6 un peu endormi
- 7 endormi, mais capable de réagir
- 8 endormi, et peu capable de réagir
- 9 très endormi, très peu capable de réagir, luttant contre le sommeil

Figure 9 : échelle de mesure de la somnolence Karolinska (KSS).

Au cours de l'expérience, les mouvements oculaires, ainsi que les mouvements de la tête du sujet étaient enregistrés à l'aide du système (Smart-Eye ®). Ce dispositif est composé de 2 caméras infrarouges placées dans l'habitacle du véhicule qui enregistre différents paramètres du visage du conducteur lors de la tâche de conduite. Ces données

transmises à un ordinateur, permettent de déterminer la position et l'orientation des yeux et de la tête en temps réel.

L'enregistrement de l'activité cérébrale (électroencéphalographique) a été effectué à l'aide d'un électro-encéphalogramme (EEG) (BioSemi®). Cette technique permet une analyse continue et très précise du déroulement temporel de l'activité cérébrale, de l'ordre de la milliseconde, lors de la réalisation de la tâche expérimentale de conduite sur le simulateur. Nous avons choisi d'utiliser un système standardisé 10/20 (Klem et al., 1999), composé de 32 électrodes maintenues à l'aide d'un bonnet synthétique. L'application d'un gel conducteur assure la transmission entre le scalp du sujet et les électrodes. Des électrodes bipolaires de références sont placées sur chaque lobe d'oreilles. Un électro-oculogramme (EOG) est également réalisé, grâce au placement d'électrodes bipolaires, disposées horizontalement sur la tempe droite et la tempe gauche, et positionnées verticalement au-dessus et en-dessous de l'œil droit.

L'analyse des données issues de l'enregistrement EEG consiste en l'extraction de la puissance des différentes fréquences. Nous avons utilisé le logiciel Brain Vision Analyzer 1.5 (Brain Products GmbH, 2012), pour le traitement du signal électroencéphalographique. Nous avons, ensuite, réalisé une cartographie de la puissance spectrale pour la bande de fréquence des ondes alpha (entre 8,5 et 12 Hz), à l'aide d'un algorithme, qui repose sur une transformée de Fourier, à partir de segments d'enregistrements EEG issus des régions d'intérêts.

IV.2.2 Distraction vs monotone :

Afin d'évaluer l'impact d'une forte distraction du conducteur sur le temps de réaction, nous avons défini deux conditions de conduite, chaque sujet ne participant qu'à l'une d'elles : soit les sujets sont sollicités régulièrement par l'expérimentateur via un interphone (condition distraction), soit ils n'interagissent pas du tout avec l'expérimentateur jusqu'à la fin du trajet (condition monotone). Dans la condition distraction, l'expérimentateur leur demande de lire un proverbe indexé par un numéro sur une liste imprimée posée sur le siège passager.

IV.2.3 Niveau de confiance dans les systèmes de contrôle des véhicules :

Pour évaluer un éventuel effet de familiarité avec les systèmes de contrôle transversal et longitudinal, et de la confiance que les sujets peuvent avoir dans ces systèmes, les participants sont invités à répondre à un questionnaire avant la séance de conduite. Le questionnaire est informatisé et est présenté figure 10. Chaque question est cotée de 1 à 4,

correspondant à une échelle de « Pas du tout d'accord » à « tout à fait d'accord ». Le score total est sur 48 points. Une analyse de variances montre que le niveau de confiance dans les systèmes de contrôle de conduite ne diffère pas entre nos 3 groupes de sujets ($F_{[2;57]} = 0,02$; $p = 0,98$), le score moyen étant de 32,68 ($\pm 7,48$) pour les sujets jeunes, 32,60 ($\pm 7,43$) pour les quadragénaires et 32,26 ($\pm 6,52$) pour les seniors.

IV.3 Conditions expérimentales

L'expérience incluait 4 conditions expérimentales, en fonction de la distance à laquelle se déportait le véhicule suivi dans le scénario 1 (66 ou 100m), ainsi qu'en fonction des conditions de conduite proposées aux sujets (monotone vs distraction). La répartition des sujets dans les 4 conditions expérimentales est donnée dans le tableau 2.

Tableau 2 : Répartition des sujets de chaque groupe dans les différentes conditions expérimentales.

Conditions de conduite	Monotone		Distraction	
	66m	100m	66m	100m
Scénario 1 : distance de déport du poids lourd				
Groupes de sujets	5 jeunes 5 quadragénaires 5 seniors	5 jeunes 5 quadragénaires 5 seniors	5 jeunes 5 quadragénaires 5 seniors	5 jeunes 5 quadragénaires 5 seniors

PAGE 1

Le système d'aide au maintien dans la voie de circulation est un système automatique qui ajuste la position du volant sans intervention du conducteur. Connaissez-vous ce système ?

Oui / Non

Ce système maintient automatique le véhicule dans la voie de circulation. Le véhicule ajuste automatique la position du volant sans intervention du conducteur.

1) Dans quelle mesure estimez-vous qu'un tel système pourrait vous être utile ?

Pas du tout / Parfois / Souvent / Très souvent

2) Pensez-vous qu'à l'heure actuelle un tel système a les mêmes capacités qu'un conducteur humain ?

Pas du tout / Un peu / Beaucoup / Tout à fait

3) Pensez-vous que dans un futur proche un tel système pourra avoir des capacités identiques à celles d'un conducteur humain ?

Pas du tout / Un peu / Beaucoup / Tout à fait

4) Pensez-vous que dans un futur plus ou moins proche, un tel système pourra avoir des capacités supérieures à celles d'un conducteur humain ?

Pas du tout / Un peu / Beaucoup / Tout à fait

5) Dans quelle mesure faites vous confiance au système actuel ?

Pas du tout / Un peu / Beaucoup / Tout à fait

6) Pensez-vous que votre confiance dans les systèmes futurs pourra être totale ?

Pas du tout / Un peu / Beaucoup / Tout à fait

PAGE 2

Le régulateur de vitesse adaptatif permet au véhicule de réguler la vitesse automatiquement tout en maintenant constamment une distance de sécurité avec les véhicules suivis, y compris si ceux opèrent un freinage d'urgence. Connaissez-vous ce système ?

Oui / Non

1) Dans quelle mesure estimez-vous qu'un tel système pourrait vous être utile ?

Pas du tout / Parfois / Souvent / Très souvent

2) Pensez-vous qu'à l'heure actuelle un tel système a les mêmes capacités qu'un conducteur humain ?

Pas du tout / Un peu / Beaucoup / Tout à fait

3) Pensez-vous que dans un futur proche un tel système pourra avoir des capacités identiques à celles d'un conducteur humain ?

Pas du tout / Un peu / Beaucoup / Tout à fait

4) Pensez-vous que dans un futur plus ou moins proche, un tel système pourra avoir des capacités supérieures à celles d'un conducteur humain ?

Pas du tout / Un peu / Beaucoup / Tout à fait

5) Dans quelle mesure faites vous confiance au système actuel ?

Pas du tout / Un peu / Beaucoup / Tout à fait

6) Pensez-vous que votre confiance dans les systèmes futurs pourra être totale ?

Pas du tout / Un peu / Beaucoup / Tout à fait

Figure 10 : Questionnaire évaluant le niveau de confiance des sujets dans les systèmes de contrôle des véhicules.

RÉSULTATS

L'ensemble des données de conduite recueillies sur simulateur provient des enregistrements des paramètres du simulateur à une fréquence de 10Hz. Les données EEG ont été analysées sur une fréquence d'échantillonnage de 512Hz.

Les résultats présentés dans le présent document intègrent le facteur « groupe » (i.e. sujets jeunes, quadragénaires, et seniors). Par contre, aucune distinction conducteur/conductrice n'est exposée ici, les analyses statistiques n'ayant démontré aucun effet du facteur « genre » sur les données étudiées.

I Analyses statistiques

Pour comparer les taux entre les groupes du type d'action prioritaire (volant, pédales de frein ou d'accélérateurs) lors de la reprise du contrôle du véhicule aux scénarii 1 et 2, ainsi que le taux de collision de chaque groupe dans le scenario 1, nous avons utilisé un test de χ^2 .

Pour les analyses statistiques de la distance de réaction (en m) mesurée au scenario 1, nous avons utilisé des analyses de variances (ANOVA) avec pour variables le facteur « groupe » (sujets jeunes quadragénaires et seniors), le facteur de conditions de conduite (monotone et distraction), ainsi que la distance de départ du véhicule suivi (66 ou 100m) pour le scenario 2. Le temps de réaction (en s), ainsi que le départ maximal (en m), ont été analysés à l'aide d'une ANOVA pour le scenario 2, des ANOVAs avec pour variables intra-sujet le facteur « groupe » (sujets jeunes quadragénaires et seniors) et le facteur de conditions de conduite (monotone et distraction). Lorsque les ANOVA révélaient un effet significatif pour plus de 2 modalités, nous avons utilisé une analyse post-hoc par des tests de Newman-Keuls, afin de préciser les effets entre les paires de modalités.

Les scores à l'échelle de mesure de la somnolence Karolinska ont été analysés au moyen d'une ANOVA à mesures répétées, avec pour variable le facteur « groupe » (sujets jeunes, quadragénaires et seniors) et les 6 périodes au cours desquelles les sujets ont répondu à l'échelle : avant et après l'épreuve de conduite, ainsi qu'avant et après chaque scénario, aux km 20, 24, 40 et 44.

La puissance spectrale des ondes alpha mesurée par EEG a été calculée lors du km précédant et suivant chaque scenario. Les analyses statistiques sur les puissances spectrales ont été réalisées par ANOVAs à mesures

répétées, avec pour variable le facteur « groupe » (sujets jeunes, quadragénaires et seniors) et les 4 périodes d'intérêt (avant et après chaque scenario).

Nous avons également réalisé des analyses corrélationnelles entre d'une part, les mesures du contrôle du véhicule par le sujet, obtenues aux scénarii 1 et 2, et, d'autre part, le score de l'échelle Karolinska et la puissance de l'onde alpha mesurés avant la survenue du scenario, ainsi que le score de confiance des participants dans les systèmes de contrôle des véhicules. Ces analyses ont été réalisées à l'aide de la corrélation de Pearson.

II Données de conduite

II.1 Action prioritaire

Dans le scenario 1, pour reprendre le contrôle du véhicule, les sujets de chaque groupe ont agi en majorité prioritairement sur le volant (tableau 3). Sur les 40 sujets jeunes et quadragénaires, 6 ont repris le contrôle du véhicule en agissant sur les pédales de frein ou d'accélérateur, alors que tous les sujets ont agi sur le volant. Les analyses statistiques ne montrent aucune différence significative entre les groupes sur le type de comportement pour reprendre le contrôle du véhicule ($K\chi^2 = 5,28$; $p = 0,26$).

Dans le scenario 2, 5 sujets jeunes et quadragénaires ont agi prioritairement sur les pédales de frein ou d'accélérateur. Tous les autres sujets, dont les 20 participants du groupe seniors, ont agi sur le volant pour reprendre le contrôle du véhicule. La répartition du type d'action prioritaire ne diffère pas entre les groupes ($K\chi^2 = 3,23$; $p = 0,52$).

Tableau 3 : Nombre de sujet par groupe ayant agi prioritairement sur le volant, la pédale de frein ou l'accélérateur, lors des scenarii 1 et 2. Les pourcentages correspondant sont indiqués entre parenthèses.

	Scenario 1			Scenario 2		
	Volant	Pédale de frein	Accélérateur	Volant	Pédale de frein	Accélérateur
Jeunes (N=20)	16 (80%)	1 (5%)	3 (15%)	17 (80%)	2 (5%)	1 (15%)
Quadragénaires (N=20)	18 (90%)	0 (0%)	2 (10%)	18 (90%)	1 (0%)	1 (10%)
Seniors (N=20)	20 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	20 (100%)	0 (0%)	0 (0%)

II.2 Taux de collision

Dans le scenario 1, 19 participants (près de 32%) sont entrés en collision avec les plots de chantier. Tous ces participants étaient dans la condition du départ du poids lourd (véhicule suivi) à 66m. Si nous considérons uniquement les sujets de cette condition expérimentale, 63% des participants de cette condition sont entrés en collision avec un plot de chantier.

Sur la totalité des participants, 6 sujets (10%) sont entrés en collision avec le véhicule de chantier. Tous avaient préalablement heurté un plot. Si nous considérons uniquement les sujets de la condition de départ à 66m, 20% des participants exposés à cette condition sont entrés en collision avec le véhicule de chantier.

Les analyses statistiques ne montrent aucune différence significative du taux de sujets entre les groupes étant entrés en collision avec les plots ou le véhicule de chantier : respectivement $\text{Khi}^2 = 1,08$; $p = 0,58$ et $\text{Khi}^2 = 1,11$; $p = 0,57$ (tableau 4).

Tableau 4 : Répartition du nombre de sujets par groupe, étant entrés ou non en collision avec un plot de la zone de chantier et le véhicule de chantier dans le scenario 1. Ces répartitions sont présentées pour les 2 conditions de départ (66 et 100m), ainsi que toute condition confondue (total). Les pourcentages correspondant sont indiqués entre parenthèses.

n : effectifs selon les conditions

N : effectifs selon les catégories d'âge

	Collision avec un plot			Collision avec le véhicule de chantier		
	Condition de départ 66m (n=10)	Condition de départ 100m (n=10)	Total (n=20)	Condition de départ 66m (n=10)	Condition de départ 100m (n=10)	Total (n=20)
Jeunes (N=20)	6 (66%)	0 (0%)	6 (30%)	2 (20%)	0 (0%)	2 (10%)
Quadragénaires (N=20)	5 (50%)	0 (0%)	5 (25%)	1 (10%)	0 (0%)	1 (5%)
Seniors (N=20)	10 (100%)	0 (0%)	10 (50%)	3 (30%)	0 (0%)	3 (15%)
TOTAL (N=60)	21 (70%)	0 (0%)	21 (35%)	6 (20%)	0 (0%)	6 (10%)

III Analyse du contrôle du véhicule par le sujet

III.1 Scenario 1 : le temps de réaction

Les temps de réaction moyens pour les 3 groupes, en fonction de la distance de départ du véhicule suivi (66 ou 100m) sont présentés sur la figure 11.

Nous n'observons aucun effet du groupe, ni de la condition de conduite (monotone / distraction) sur le temps de réaction des sujets ($F_{[2;48]} = 0,16$; $p = 0,86$; $F_{[1;48]} = 1,31$; $p = 0,26$ et $F_{[1;48]} = 0,83$; $p = 0,37$ respectivement).

Nous n'observons aucun effet d'interaction sur le temps de réaction entre le groupe et, d'une part, la distance de départ ($F_{[2;48]} = 0,12$; $p = 0,89$), et, d'autre part, la condition de conduite ($F_{[2;48]} = 0,09$; $p = 0,91$). L'ANOVA ne révèle aucune interaction significative entre les distances de départ et les conditions de conduite ($F_{[1;48]} = 20,95$; $p =$

0,09), ni entre les 3 facteurs sur le temps de réaction ($F_{[2;48]} = 0,18$; $p = 0,83$).

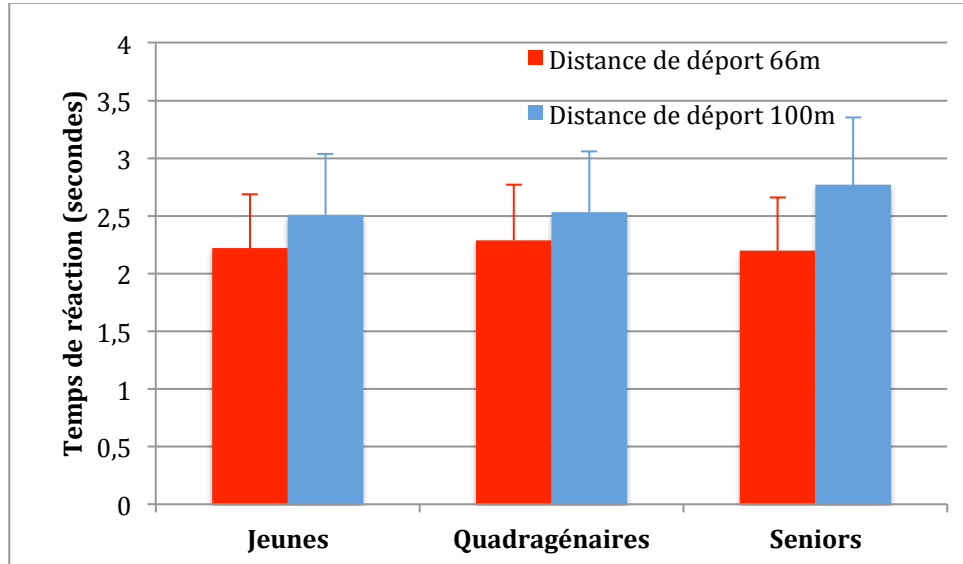


Figure 11 : Temps de réaction moyens lors du scénario 1, pour les 3 groupes, en fonction de la distance de départ du véhicule suivi (66 ou 100m). Les barres représentent les écarts-types.

EXEMPLES DU CONTRÔLE DU VÉHICULE LORS DU SCENARIO 1 CHEZ 3 PARTICIPANTS

La figure 12 présente les trajectoires de 3 sujets (N° 9, 24 et 45) qui sont les plus représentatives de celles observées lors du scénario 1. Sur le parcours, des plots délimitent une zone de chantier dans laquelle est stationnée un véhicule de chantier (rectangle orange). Le véhicule du sujet a le système de conduite autonome activé. Ce dernier présente une défaillance, ne détectant pas la présence des plots : si le sujet ne reprend pas le contrôle du véhicule, celui-ci suit le tracé jaune présenté sur le schéma, aboutissant à une collision avec les plots et le véhicule de chantier. La flèche bleue indique la position à partir de laquelle le sujet peut voir pour la première fois la zone de chantier, après que le véhicule suivi (un poids lourd) se soit rabattu sur la voie de gauche. Pour le sujet 9, la distance de visualisation est de 100m par rapport au premier plot, alors que pour les sujets 24 et 45, cette distance est réduite à 66m. Le tracé rouge indique la trajectoire des 3 sujets. Pour le sujet 9, la zone de chantier a été évitée. Par contre, pour les participants 24 et 45, le véhicule est entré dans la zone de chantier. Le sujet 45 est également entré en collision avec le véhicule de chantier.

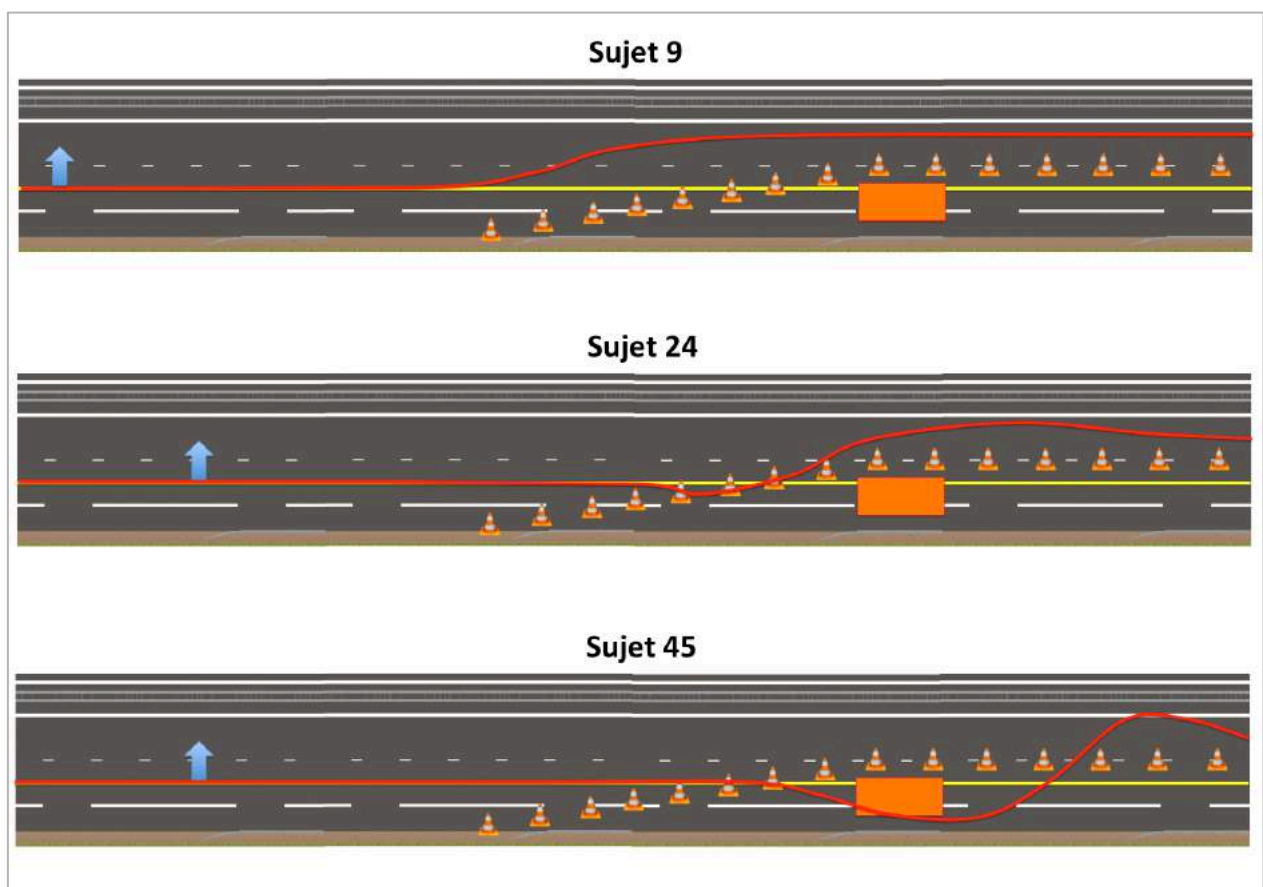


Figure 12 : exemples de la trajectoire du véhicule après la reprise en main par le conducteur lors du scénario 1, chez 3 participants (sujets 9, 24 et 45).

III.2 Scenario 2 : le temps de réaction, le déport maximal & le temps de reprise en main

III.2.1 Le temps de réaction

Les temps de réaction moyens pour les 3 groupes en fonction des conditions de conduite (monotone et distraction) sont présentés sur la figure 13.

Nous n’observons aucun effet du groupe, ni de la condition de conduite sur le temps de réaction ($F_{[2;54]} = 0,44$; $p = 0,65$ et $F_{[1;54]} = 0,22$; $p = 0,64$ respectivement). Nous n’observons aucun effet d’interaction sur le temps de réaction entre les groupes et les conditions de conduite ($F_{[2;54]} = 1,94$; $p = 0,15$).

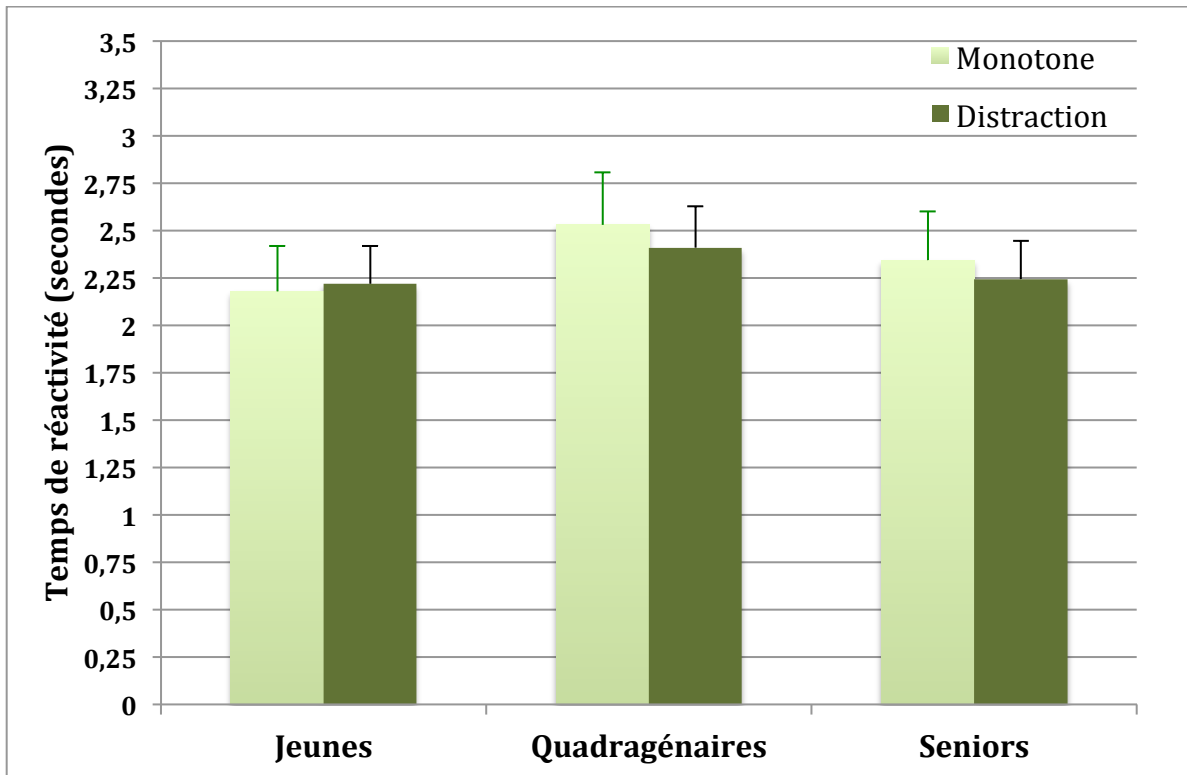


Figure 13 : Les temps de réaction moyens mesurés lors du scénario 2, pour les 3 groupes, en fonction de la condition de conduite (Monotone ou distraction). Les barres représentent les écarts-types.

III.2.2 Le déport maximal

Les déports maximaux moyens pour les 3 groupes en fonction des conditions de conduite (monotone et distraction) sont présentés sur la figure 14.

L'ANOVA révèle un effet significatif du groupe sur le déport maximum ($F_{[2;54]} = 3,54 ; p = 0,04$). Les tests de Newman-Keuls montrent que les seniors présentent un déport maximal significativement supérieur à celui des sujets jeunes et de quadragénaires ($p = 0,01$ dans les 2 cas). Le déport maximal moyen ne diffère pas entre le groupe de sujets jeunes et les quadragénaires ($p = 0,64$).

Nous n'observons aucun effet de la condition de conduite sur le déport maximal ($F_{[1;54]} = 0,32 ; p = 0,57$). Les analyses statistiques ne montrent aucun effet d'interaction sur le déport maximal entre les groupes et les conditions de conduite ($F_{[2;54]} = 1,29 ; p = 0,28$).

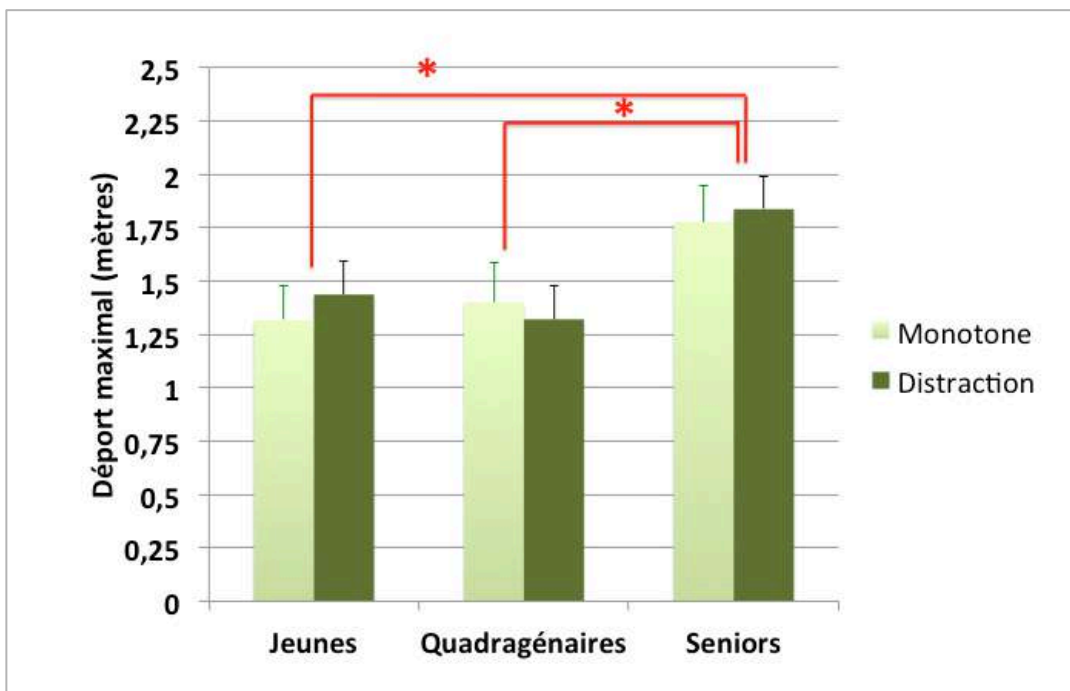


Figure 14 : Déports maximaux moyens mesurés lors du scénario 2, pour les 3 groupes, en fonction de la condition de conduite (Monotone ou distraction). Les barres représentent les écarts-types. * : $p < 0,05$

III.2.3 Temps de reprise en main

Les temps de reprise en main moyens pour les 3 groupes en fonction des conditions de conduite (monotone et distraction) sont présentés sur la figure 15.

Les temps de reprise en main diffèrent significativement entre les groupes ($F_{[2;54]} = 3,39$; $p = 0,03$). Les tests de Newman-Keuls montrent que les seniors ont un temps de reprise significativement supérieur à celui des sujets jeunes et de quadragénaires ($p < 0,01$ dans les 2 cas). Le temps de reprise du contrôle optimal ne diffère pas entre le groupe de sujets jeunes et les quadragénaires ($p = 0,82$).

Nous n’observons aucun effet de la condition de conduite sur le temps de reprise en main ($F_{[1;54]} = 0,58$; $p = 0,44$). Les analyses statistiques ne montrent aucun effet d’interaction sur le déport maximal entre les groupes et les conditions de conduite ($F_{[2;54]} = 0,11$; $p = 0,90$).

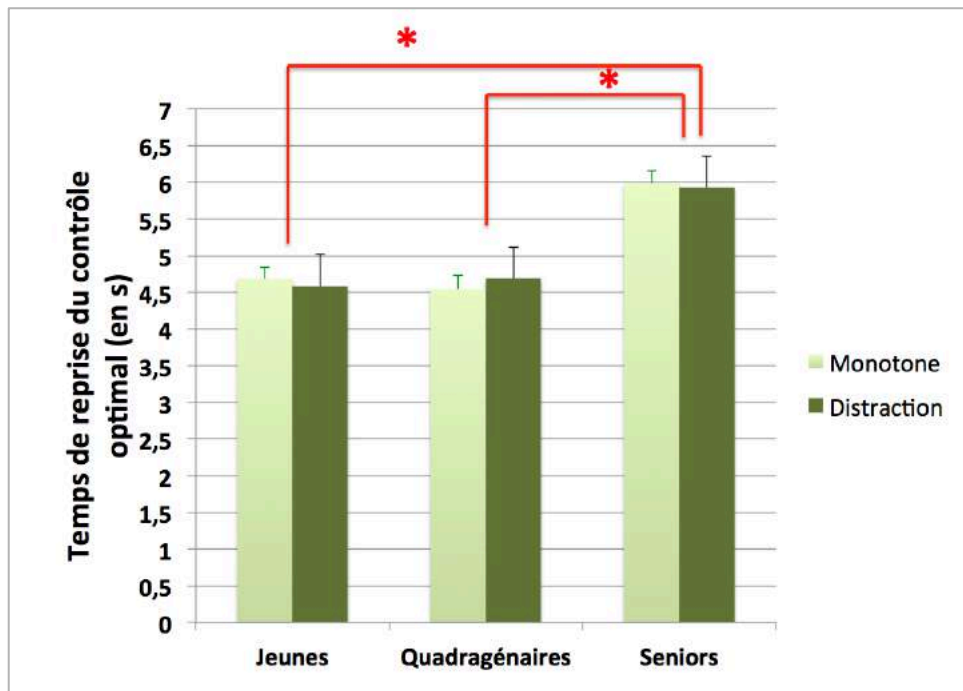


Figure 15 : Temps de reprise en main moyens mesurés lors du scénario 2, pour les 3 groupes, en fonction de la condition de conduite (Monotone ou distraction). Les barres représentent les écarts-types. * : $p < 0,05$

EXEMPLES DE LA REPRISE EN MAIN DU VÉHICULE LORS DU SCENARIO 2 CHEZ 3 PARTICIPANTS

La figure 16 présente les trajectoires les plus représentatives de celles observées lors du scénario 2 (sujets N° 39, 16 et 19). Le parcours présentait une courbe, mais pour faciliter la lecture du schéma, il est présenté sur la figure 16 en ligne droite.

La flèche bleue sous chaque tracé représente le décours temporel en secondes. Le temps -2 correspond au moment où le sujet est averti visuellement de la désactivation du système de conduite autonome dans les 2 secondes à venir. Le temps 0 correspond à la désactivation du système de conduite autonome avec avertissement par un signal sonore. Le tracé rouge correspond au parcours suivi par le véhicule : à partir du temps 0, le véhicule dévie sa trajectoire en raison de la désactivation du système. La flèche rouge correspond au moment où le sujet agit sur le véhicule afin de reprendre son contrôle. Dans les 3 cas présentés ici, les participants ont agi prioritairement sur le volant. La flèche jaune indique le moment où le véhicule a atteint le déport maximum, c'est-à-dire le moment où il était le plus éloigné de l'axe central de la voie.

Pour ce scénario, les sujets ayant eu des difficultés à stabiliser le véhicule dans la voie de circulation après la reprise en main, sont ceux qui ont eu plus de deux actions sur le volant dans des directions opposées (i.e. à gauche et à droite), avant la stabilisation du véhicule. Les résultats montrent que sur les 60 participants, 70% ont dû réaliser plus de deux manœuvres avant que le véhicule ne retrouve l'axe de la voie de circulation. Le taux de conducteurs ayant présenté ces difficultés est équivalent entre les différentes catégories d'âge : 70% chez les jeunes conducteurs, 65% chez les quadragénaires et 75% chez les seniors ($\text{Khi}^2 = 0,48$; $p = 0,79$).

Certains des sujets se sont également retrouvés dans des situations très dangereuses lors de leur manœuvre : le véhicule est entré sur la voie de circulation de gauche ou sur la bande d'arrêt d'urgence. Nous avons observé qu'au total, 15% des sujets ($n = 9/60$) ont été confrontés à une telle situation à risque. Ce taux est équivalent entre les différentes catégories d'âge : 15% chez les jeunes conducteurs, 10% chez les quadragénaires et 20% chez les seniors ($\text{Khi}^2 = 0,78$; $p = 0,68$).

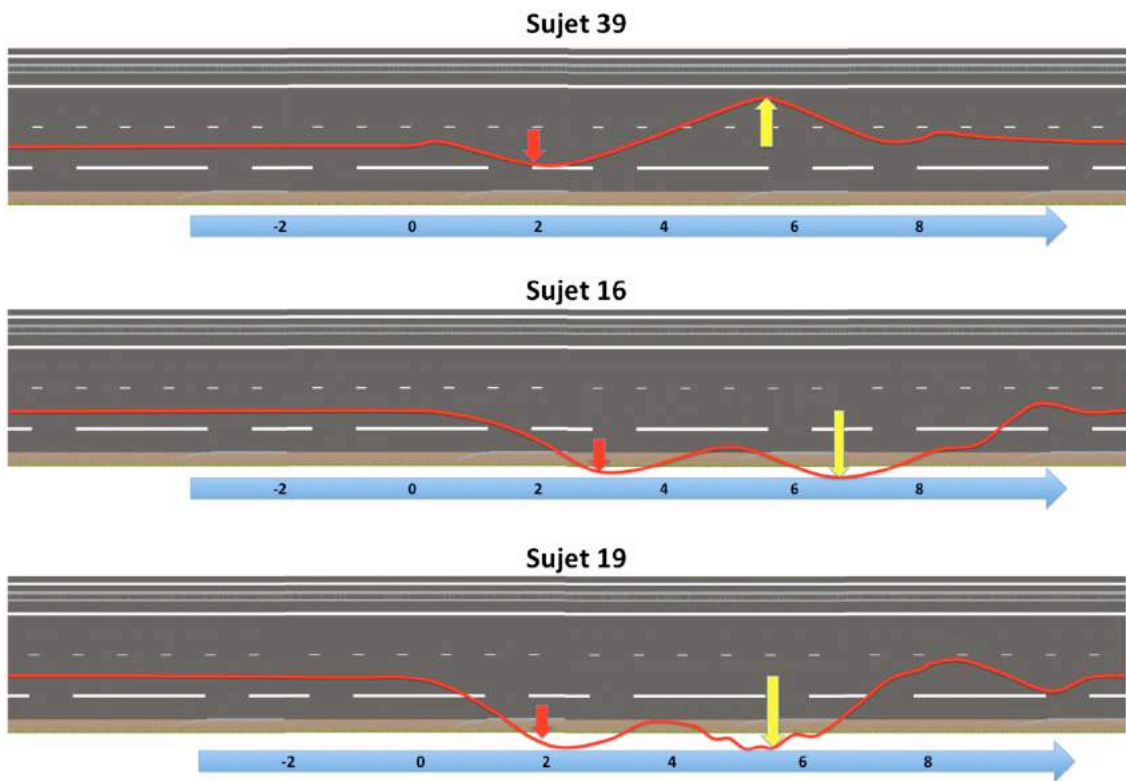


Figure 16 : exemples de la trajectoire du véhicule après la reprise en main par le conducteur lors du scénario 2, chez 3 participants (sujets 39, 16 et 19).

IV Mesures de l'hypovigilance

IV.1 Échelle de mesure de la somnolence Karolinska

Les scores moyens à l'échelle de mesure de la somnolence Karolinska pour les 3 groupes et pour les 6 périodes d'évaluation (avant et après l'épreuve de conduite, ainsi qu'avant et après chaque scénario) sont présentés sur la figure 17.

Les ANOVAs révèlent un effet principal du facteur groupe sur les scores moyens à l'échelle Karolinska ($F_{[2;57]} = 3,16$; $p = 0,05$). Les tests de Newman-Keuls précisent que les scores moyens des seniors sont significativement inférieurs (i.e., moins de fatigue) à ceux des participants jeunes et quadragénaires ($p = 0,05$ dans les 2 cas). Les scores à l'échelle Karolinska diffèrent également significativement en fonction des périodes ($F_{[5;285]} = 98,16$; $p < 0,01$). Les analyses post-hoc montrent que les scores à l'échelle mesurés avant et après l'épreuve de conduite, ainsi qu'avant et après chaque scénario, sont significativement supérieurs à ceux mesurés après la survenue des 2 scénarii ($p < 0,01$ dans tous les cas). Aucune autre comparaison ne présente une différence significative.

Les analyses statistiques montrent une interaction significative entre le facteur groupe et les périodes de mesure sur le score moyen à l'échelle Karolinska ($F_{[10;285]} = 3,42$; $p < 0,01$). Les tests de Newman-Keuls montrent que les scores moyens sont identiques entre les groupes avant et après l'épreuve de conduite, ainsi qu'avant la survenue du scénario 1, et après la réalisation des 2 scénarii. Par contre, avant la survenue du scénario 2 et après l'épreuve de conduite, les seniors présentent un score moyen à l'échelle Karolinska significativement inférieur à celui des participants jeunes et quadragénaires ($p < 0,01$ et $p = 0,01$ respectivement). Pour ces 2 périodes, les scores des sujets jeunes et quadragénaires sont équivalents ($p = 0,95$ et $p = 0,82$ respectivement).

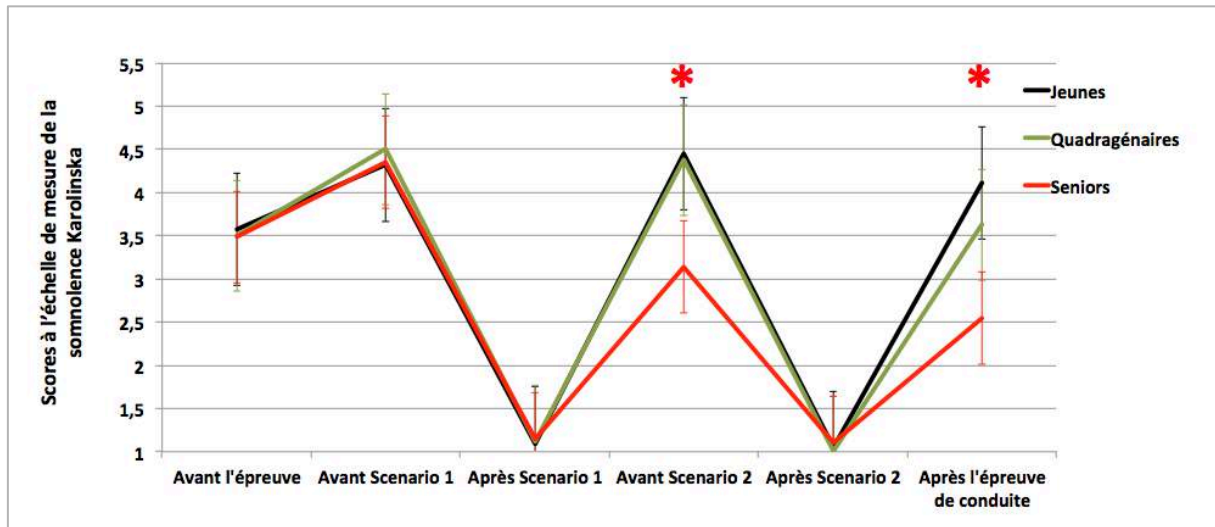


Figure 17 : Scores moyens à l'échelle de mesure de la somnolence Karolinska pour les 3 groupes de sujets et pour les 6 périodes d'évaluation : avant et après l'épreuve de conduite, ainsi qu'avant et après chaque scénario. Les barres représentent les écarts-types. * : $p < 0,05$

IV.2 Puissance des ondes alpha

Les cartographies au niveau du scalp de la puissance des ondes alpha pour les 3 groupes de sujets et pour les 4 périodes d'enregistrement (avant et après chaque scénario) sont présentées sur la figure 18 (haut). Ces données indiquent que lors de la conduite en mode autonome, une puissance élevée des ondes alpha est enregistrée sur une vaste surface du scalp pour les 3 groupes. Par contre, cette puissance diminue fortement après la survenue de chaque scénario, quelle que soit la catégorie d'âge.

Les puissances spectrales des ondes alpha pour chaque groupe et chaque période d'intérêt (lors du km précédant et suivant chaque scénario) sont présentées sur la figure 18 (bas). Les ANOVAs montrent un effet du groupe sur la puissance spectrale des ondes alpha ($F_{[2;57]} = 3,57$; $p = 0,08$). Les tests de Newman-Keuls montrent que les puissances spectrales relevées chez les sujets jeunes et quadragénaires sont significativement plus élevées que celles des seniors ($p = 0,01$ et $p = 0,05$ respectivement). La puissance spectrale des ondes alpha des sujets jeunes est également plus élevée que celle enregistrée chez les quadragénaires ($p = 0,05$). Les puissances spectrales varient significativement selon les périodes d'intérêt ($F_{[3;171]} = 9,02$; $p < 0,01$). Les analyses post-hoc montrent que les puissances des ondes alpha relevées avant le scénario 1 sont significativement supérieures à celles enregistrées après les scénarii 1 et 2 ($p < 0,01$ dans les 2 cas). Les puissances spectrales mesurées avant le scénario 1 sont également supérieures à celles enregistrées après les

scenarii 1 et 2 ($p < 0,01$ et $p = 0,01$ respectivement). Aucune autre comparaison post-hoc ne montre un effet significatif. Les ANOVAs montrent une interaction significative entre le facteur groupe et les périodes d'enregistrement sur les puissances spectrales ($F_{[6;171]} = 2,48$; $p = 0,03$). Les tests de Newman-Keuls montrent qu'avant le scenario 1, la puissance des ondes alpha chez les sujets jeunes est significativement plus élevée que celle relevée chez les quadragénaires et les seniors ($p < 0,01$ dans les 2 cas), alors qu'elle ne diffère pas entre ces 2 groupes ($p = 0,49$). Avant le scenario 2, la puissance spectrale des sujets jeunes et quadragénaires est significativement plus élevée que celle des seniors ($p < 0,01$), mais reste équivalente entre les participants jeunes et quadragénaire ($p = 0,78$). Après les scenarii 1 et 2, les puissances spectrales sont équivalentes entre les 3 groupes. Chez les sujets jeunes et quadragénaires, les puissances des ondes alpha relevées avant la survenue de chaque scenario sont significativement supérieures à celles mesurées après les scenarii 1 et 2 ($p < 0,01$ dans tous les cas). Chez les seniors, la puissance spectrale mesurée avant la survenue du scenario 1, est significativement supérieure à celles enregistrée après les 2 scenarii, ainsi qu'après la réalisation du scenario 1 ($p = 0,01$ dans tous les cas). Par contre, les puissances spectrales mesurées après les 2 scenarii et avant le scenario 2 sont équivalentes chez les seniors.

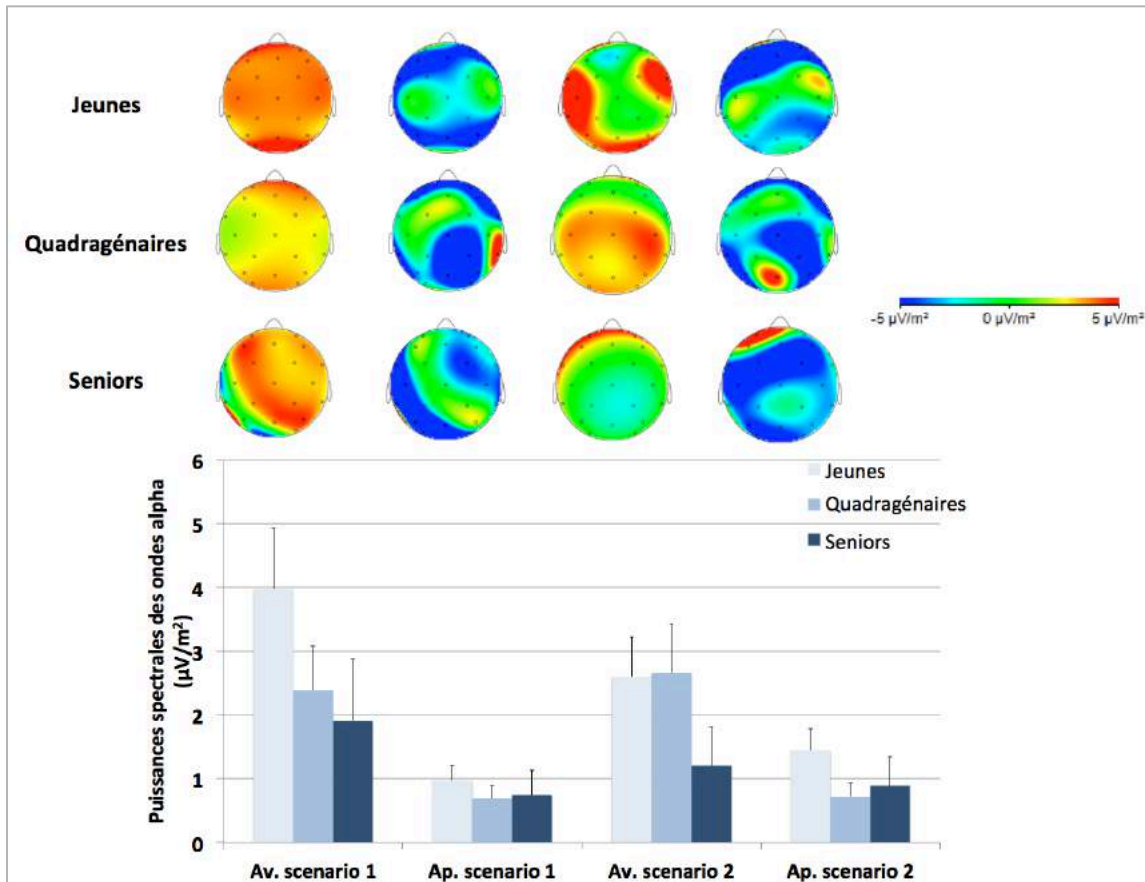


Figure 18 : En haut - Cartographies au niveau du scalp de la puissance des ondes alpha pour les 3 groupes de sujets et pour les 4 périodes d'enregistrement (lors du km précédant et suivant chaque scénario). **En bas** - Puissances spectrales moyennes des ondes alpha (pour chaque groupe et pour les 4 périodes d'intérêt).

V Analyses corrélationnelles

L'ensemble des analyses corrélationnelles pour les sujets, quelle que soit leur catégorie d'âge, est présenté dans le tableau 5. Pour le scénario 1, la distance de réaction n'est pas significativement corrélée au score de l'échelle Karolinska et à la puissance de l'onde alpha mesurés avant la survenue du scénario 1. Par contre, la distance de réaction est significativement corrélée au score de confiance dans les systèmes de contrôle des véhicules ($R = -0,35$; $p = 0,03$). En d'autres termes, plus le score de confiance dans ces systèmes est élevé, plus la distance à l'obstacle est faible avant réaction (Figure 19).

Pour le scénario 2, aucune corrélation significative n'est observée entre d'une part, les différentes mesures du contrôle du véhicule (le temps de réaction, le déport maximal & Temps de reprise en main) et, d'autre part, le score de l'échelle Karolinska et la puissance de l'onde alpha mesurés

avant la survenue du scénario 2, ainsi que le score de confiance des participants dans les systèmes de contrôle des véhicules.

Tableau 5 : Résultats des analyses corrélationnelles entre d’une part, les mesures du contrôle du véhicule obtenues aux scénarii 1 et 2, et, d’autre part, le score de l’échelle Karolinska et la puissance de l’onde alpha mesurés avant la survenue du scénario, et le score de confiance des participants dans les systèmes de contrôle des véhicules. Les corrélations statistiquement significatives sont présentées en gras.

	Score de confiance dans les systèmes de contrôle des véhicule	Score au questionnaire Karolinska avant la survenue du scénario	Puissance de l’onde alpha avant la survenue du scénario
Distance de réaction (scénario 1)	R = -0,35 p = 0,03	R = -0,09 p = 0,56	R = -0,14 p = 0,37
Temps de réaction (scénario 2)	R = -0,01 p = 0,98	R = -0,04 p = 0,79	R = 0,15 p = 0,36
Déport maximal (scénario 2)	R = 0,11 p = 0,46	R = 0,01 p = 0,95	R = -0,22 p = 0,16
Temps de reprise du contrôle optimal (scénario 2)	R = 0,07 p = 0,65	R = 0,23 p = 0,11	R = 0,12 p = 0,47

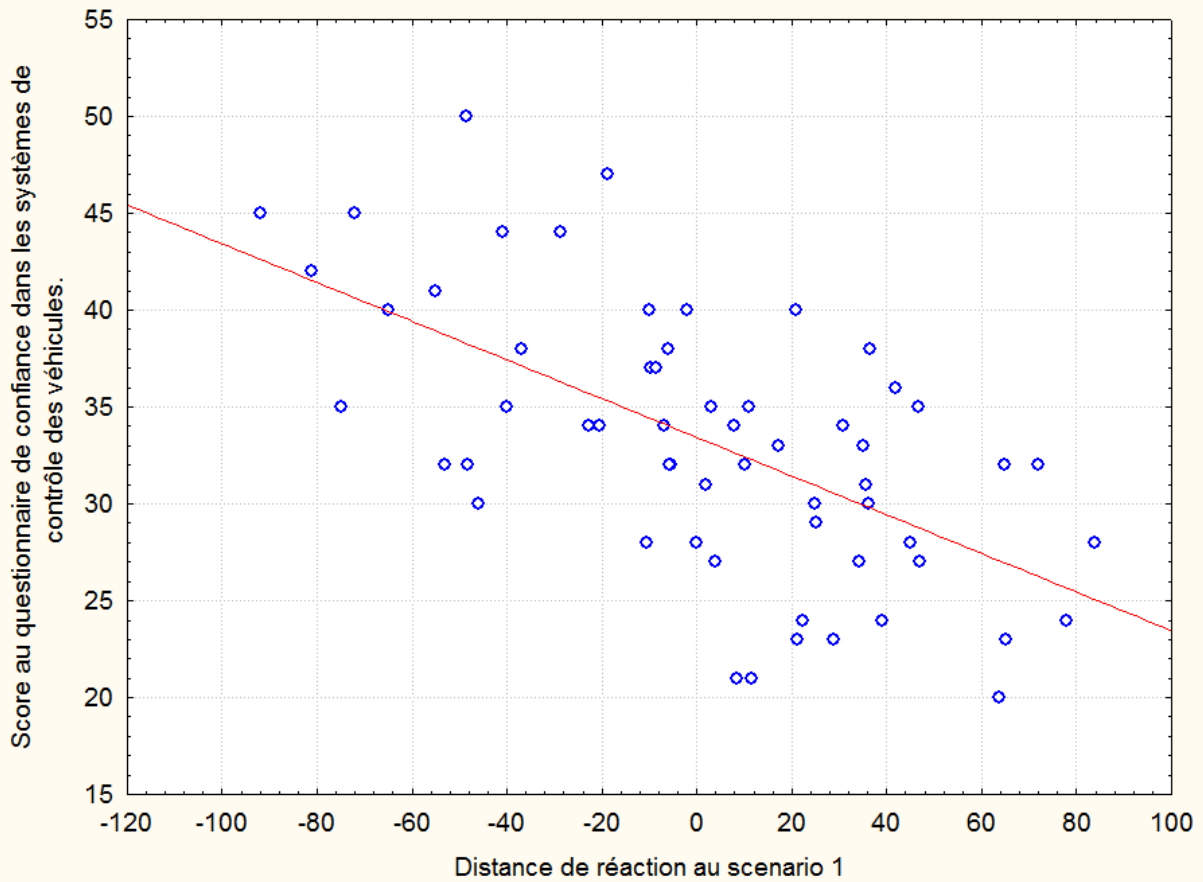


Figure 19 : Nuage de points (en bleu) et droite de corrélation (rouge) entre les scores au questionnaire de confiance dans les systèmes de contrôle des véhicules et la distance de réaction mesurée lors de scenario 1, pour les 60 participants de l'étude. L'analyse statistique révèle une corrélation significative ($R = -0,35$; $p = 0,03$).

CONCLUSION

L'objectif de cette étude était de voir dans quelle mesure des conducteurs sont capables de reprendre le contrôle d'un véhicule qui était en fonctionnement autonome sur un parcours autoroutier. Deux situations ont été simulées. La première simulait une situation complexe de défaillance de détection d'un objet par le système autonome, qui nécessitait une reprise en main rapide par le conducteur, sans attendre que le véhicule revienne automatiquement en mode manuel. La seconde situation simulait un fonctionnement normal du système de contrôle longitudinal et transversal qui se désactivait automatiquement en raison d'un défaut de marquage sur la route. Le conducteur était averti par un signal lumineux puis sonore qu'il devait reprendre le contrôle du véhicule.

Les résultats montrent que l'utilisation des systèmes de contrôle fait appel à de nouvelles aptitudes de conduite et une bonne maîtrise du fonctionnement des systèmes de contrôle. Dans la première situation simulée, où le conducteur doit se rendre compte par lui-même que le système de contrôle ne pourra pas gérer la complexité de la situation, la majorité des sujets ne parvenaient pas à reprendre en main le contrôle du véhicule sans accident. Il est difficile d'estimer la probabilité d'occurrence d'un scénario critique tel que celui qui a été retenu dans notre étude. Néanmoins, les résultats montrent que le temps nécessaire pour analyser une situation dangereuse ne laisse pas beaucoup de place à une analyse supplémentaire, à savoir la possibilité de gestion ou non de la situation par le système de contrôle autonome. Cela est confirmé par un nombre de collision significativement plus important par le groupe des personnes âgées dans cette étude. Le temps de traitement est connu pour augmenter avec l'âge, résultat que nous retrouvons dans notre expérience avec des temps de réaction significativement plus longs pour le groupe des plus de 60 ans. De plus, 50% des sujets de ce groupe n'ont pas réussi à éviter une collision avec les cônes de marquage de la zone de travaux, alors que chez les sujets jeunes et quadragénaires le taux est inférieur à 30% (même si cette différence n'est pas statistiquement significative). Ce résultat souligne également la grande variabilité interindividuelle à laquelle il faut s'attendre au niveau des aptitudes à interagir avec les systèmes de conduite autonome.

Dans la seconde situation simulée, où la reprise en main du véhicule semble a priori relativement aisée, les conducteurs ne parviennent pas à éviter des manœuvres dangereuses, comme maintenir le véhicule dans l'axe de la voie lorsque le contrôle est rendu au conducteur dans un virage. Les temps de réaction très longs (plusieurs secondes pour certains) et la grande variation de la trajectoire du véhicule avant sa reprise en main montrent que lorsque les sujets ne sont pas préparés, ils peuvent se retrouver dans des situations dangereuses. Plusieurs sujets sont sortis de la voie de circulation, certains prenant même en première intention une direction opposée à la bonne direction.

Un troisième aspect intéressant qui ressort de cette étude est la question de l'hypovigilance et de la distraction qui peuvent être favorisées lorsque le contrôle est délégué au véhicule. Comme nous l'avons remarqué dans le cas du régulateur de vitesse dans une étude précédente, le contrôle du véhicule par un système autonome entraîne une moindre activité du conducteur. Ce manque d'activité va accélérer l'entrée en hypovigilance. Dans notre étude, après seulement 20 Km (10 minutes de conduite) le niveau de somnolence augmente de plus de 4 points sur l'échelle de KSS qui en compte 9. Cet état d'hypovigilance exprimé de manière subjective est objectivé par une importante augmentation du rythme alpha au niveau cérébral pour l'ensemble des sujets, mais de manière plus marquée pour les jeunes conducteurs.

Bien que nous ne l'ayons pas testé dans notre étude, nous pouvons anticiper, qu'à l'opposé, les conducteurs se permettront un niveau de distraction plus important en conduite autonome qu'en conduite manuelle.