



HAL
open science

ALCOol, vigiLance, Charge de travail: facteurs d'accident chez les jeunes conducteurs

Catherine Berthelon, Edith Galy, Julie Paxion, Laurent Ferrier

► To cite this version:

Catherine Berthelon, Edith Galy, Julie Paxion, Laurent Ferrier. ALCOol, vigiLance, Charge de travail: facteurs d'accident chez les jeunes conducteurs. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2016, 63p. hal-01407380

HAL Id: hal-01407380

<https://hal.science/hal-01407380v1>

Submitted on 2 Dec 2016

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.

ALCOol, vigiLAnce, Charge de travail : facteurs d'accident chez les jeunes conducteurs

ALCOLAC

Rapport final

IFSTTAR-TS2 / Laboratoire Mécanismes d'Accidents (LMA)

Centre de Recherche PsyCLE, Équipe « Cognition, émotion et expertise »

Convention 2013/MP/03



Auteurs :

Catherine Berthelon^a, Edith Galy^b, Julie Paxion^{a, b}, Laurent Ferrier^a

^a Département Transport Santé Sécurité (TS2) / Laboratoire Mécanismes d'Accidents (LMA)
Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
Cité Descartes, Champs sur Marne, 14-20 boulevard Newton, 77447 Marne la Vallée Cedex

^b Université d'Aix Marseille (AMU)
Centre de Recherche PsyCLE, Equipe « Cognition, émotion et expertise »
Pôle de Psychologie, Sciences de l'Éducation
29 avenue R. Schuman, 13621 Aix-en-Provence Cedex 1

Pour la production d'images :

Isabelle Aillerie

Département Composants et Systèmes (COSYS) / Laboratoire exploitation, perception, simulateurs et simulations (LEPSIS)
Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
Cité Descartes, Champs sur Marne, 14-20 boulevard Newton, 77447 Marne la Vallée Cedex

SOMMAIRE

Rapport final.....	1
1. Rappel du contexte et du positionnement du projet	5
1.2. Thématique et population étudiée	6
1.3. Outil d'expérimentation	6
2. Première expérience : vigilance, charge de travail, tension et jeunes conducteurs	6
2.1. Contexte théorique	7
2.1.1. Difficultés des tâches de conduite inhérentes aux situations.....	7
2.1.2. Surcharge : impact de la situation de conduite et de l'expérience.....	7
2.1.3. Etats internes modulant la surcharge.....	9
2.1.4. Problématique.....	11
2.2. Partie expérimentale	12
2.2.1. Les participants.....	12
2.2.2. Protocole expérimental.....	12
2.2.3. Analyses statistiques.....	15
2.2.4. Résultats	16
2.2.4.1. Portions sans piétons	16
2.2.4.2. Portions avec piétons.....	19
2.3. Discussion et conclusion de la première expérience	23
3. Seconde expérience : vigilance, alcool et jeunes conducteurs	26
3.1 Contexte théorique	26
3.1.1. Vigilance, conduite et jeunes conducteurs	26
3.1.2. Impact de l'alcool sur la conduite	27
3.1.3. Problématique.....	29
3.2. Partie expérimentale	30
3.2.1. Les participants.....	30
3.2.2. Protocole expérimental.....	31
3.2.3. Analyses statistiques.....	32
3.2.4. Résultats	32
3.3. Discussion et conclusion de la seconde expérience.....	42
4. Discussion et conclusion générale.....	46
Valorisation	47
Références	48

Annexe 1	53
Résultats de la première expérience, obtenus dans les portions sans piétons.....	53
Résultats de la première expérience, obtenus dans les portions avec piétons	55
Annexe 2	57
Résultats de la seconde expérience.....	57

1. Rappel du contexte et du positionnement du projet

L'âge et le sexe des conducteurs représentent les principaux facteurs d'implication dans les accidents (source ONISR, 2012). Les études épidémiologiques montrent ainsi que les jeunes ont une probabilité d'être impliqués dans un accident largement plus importante que celle des autres conducteurs à l'exclusion des conducteurs les plus âgés et les jeunes conducteurs masculins âgés de moins de 24 ans présentent un risque plus élevé d'accidents. De plus, les statistiques mensuelles d'accidents après l'obtention du permis de conduire montrent que le taux initial très élevé d'accidents décroît rapidement pendant les premiers mois de conduite.

Par ailleurs, d'après le modèle de courbe en U renversé d'Anseau et Timsit-Berthier (1987 ; in Hadj-Mabrouk et al., 2001), le niveau de performance augmente avec celui de la vigilance jusqu'à un optimum, au-delà de cet optimum l'augmentation de la vigilance entraîne au contraire une baisse de la performance. L'excès de vigilance que représentent le stress ou l'hyperexcitation a un pouvoir de dégradation plus rapide sur les activités complexes que sur les activités les plus simples. Il y a donc un niveau optimal de vigilance pour chaque type de tâche réalisée et la dégradation de la performance peut être liée à de l'hypovigilance ou de l'hypervigilance.

La charge de travail est ainsi également en lien avec la vigilance. Une augmentation de cette charge entraîne en effet une hausse de la vigilance mais la tendance s'inverse lorsque les tâches difficiles et précises entraînent une surcharge, avec dans ce cas une diminution de la vigilance. De plus, lorsque la tension reflétant l'évaluation du danger relatif aux activités est élevée, cela entraîne une hausse de la charge de travail subjective et une baisse de vigilance (Thayer, 1986).

L'objet du travail est donc de manipuler ces facteurs de variations de la vigilance afin d'estimer en quoi leurs effets peuvent s'avérer délétères sur la conduite, notamment chez de très jeunes conducteurs novices.

D'autre part, jusqu'alors les recherches ont comparé les performances de jeunes conducteurs novices à celles de conducteurs plus expérimentés et plus âgés. Les facteurs liés à l'âge entrent ainsi en jeu dans les résultats, tel le fait que les jeunes conducteurs ont tendance à prendre plus de risques que les conducteurs plus âgés (plus d'excès de vitesse, non-respect des distances de sécurité), ce qui rend difficile la dissociation de l'effet de l'âge et de l'expérience. Afin d'éviter cette confusion, nous avons réduit les écarts d'âge entre les groupes de conducteurs étudiés. Ceci justifie notre choix d'étudier les performances de jeunes conducteurs novices et de jeunes conducteurs expérimentés d'âge très proche (18 ans versus 21 ans). D'autre part, la durée du permis probatoire est de 3 ans en France et pour une personne ayant obtenu son permis de conduire à 18 ans, 21 ans correspond donc à la fin de cette période probatoire.

Le permis probatoire a été instauré le 1er mars 2004, avec un permis de conduire de 6 points. Si le conducteur novice n'a commis aucune infraction, ce n'est qu'à partir de la fin du permis probatoire qu'il se verra attribué un permis de conduire de 12 points. Des restrictions concernant les limitations de vitesse sont également à suivre durant la période probatoire (maximum 110 km/h sur autoroute limitée à 130 km/h, maximum 100 km/h sur autoroute limitée à 110 km/h et maximum 80 km/h sur route limitée à 90 km/h).

1.2. Thématique et population étudiée

La thématique abordée dans ce projet concerne la mise en évidence de facteurs d'accident chez les jeunes conducteurs : en premier lieu la charge de travail et le comportement en lien avec la tension et la vigilance, en second lieu la prise de faibles doses d'alcool en lien avec la vigilance. L'objectif général est d'arriver à mieux identifier les facteurs susceptibles d'accroître l'implication des jeunes conducteurs dans les accidents de la route afin d'envisager des actions de sensibilisation et de formation plus ciblées.

1.3. Outil d'expérimentation

L'unité de Recherche Mécanismes d'Accidents dispose d'un simulateur de conduite avec lequel les travaux proposés dans ce projet seront réalisés (Photo 1). C'est un simulateur à base fixe, l'espace conducteur est complet (tableau de bord, pédalier, volant et commandes principales). Les organes de commande suivants : volant, pédale d'accélérateur, pédale de frein, commodo volant et commodo central (contact, démarreur et interrupteur de frein à main) sont équipés de capteurs. Les indicateurs de vitesse, compteurs et voyants du tableau de bord sont connectés. L'image de la scène routière est projetée à l'avant sur 3 écrans, un écran central situé face au conducteur et 2 écrans latéraux orientés à 50° (placés à 1.93 m de l'œil du conducteur), soit un champ visuel de 150° en horizontal et 40° en vertical, chaque écran à une résolution de 1280 x 1024 pixels (Photo 1). La fréquence d'acquisition des différents signaux (position, vitesse, accélération, ...) est de 30 Hz environ.

Un son en quadriphonie est diffusé dans la cabine – bruits internes au véhicule (moteur, roulement, démarreur) et bruits externes spatialisés du trafic. Le simulateur est composé d'un module graphique SIM2 permettant la visualisation en temps réel des scènes visuelles et des scénarii routiers. La gestion du trafic routier se fait par un logiciel nommé Archisim.



Photo 1. Le simulateur de conduite de l'IFSTTAR/LMA.

Le lieu d'expérimentation dans lequel est placé le simulateur est agréé par l'agence régionale de santé de la région Provence Alpes Côte d'Azur et permet d'effectuer des recherches biomédicales.

2. Première expérience : vigilance, charge de travail, tension et jeunes conducteurs

Cette expérience a pour but d'évaluer l'influence de l'expérience de conduite et de la complexité de la situation sur la charge de travail, la vigilance et la tension perçues et de les

confronter à des données objectives (physiologiques et comportementales). Les stratégies et le niveau de vigilance de conducteurs expérimentés sont comparés à ceux de conducteurs débutants. L'effet de la complexité de l'environnement (difficulté du circuit routier simulé) est également testé.

2.1. Contexte théorique

2.1.1. Difficultés des tâches de conduite inhérentes aux situations

Les tâches se complexifient avec l'augmentation du nombre d'éléments à traiter cognitivement. Par exemple, des situations de conduite composées de routes sinueuses impliquent des tâches complexes. En effet, conduire dans un virage peut se décomposer en trois sous-tâches (Cavallo, Brun-Dei, Laya, & Neboit, 1988) : 1/ entrer dans le virage en décidant du moment approprié pour tourner le volant et anticiper l'amplitude et la vitesse de sa variation, 2/ poursuivre le virage en maintenant le volant dans la trajectoire tout en effectuant des ajustements directionnels en fonction des exigences de la situation, 3/ sortir du virage en décidant du moment pour redresser le volant et aligner le véhicule avec la trajectoire souhaitée. La complexité de ces sous-tâches allonge le temps de traitement de l'information (Jensen, 1992, 1998 ; in Arend et al., 2003), ce qui rend leur réalisation difficile dans les temps impartis. Le taux de changement d'incurvation de la route sert ainsi de critère objectif pour la difficulté de la tâche (Richter, Wagner, Heger, & Weise, 1998 ; Backs, Lenneman, Wetzel, & Green, 2003 ; in Ba & Zhang, 2011).

La difficulté d'une situation peut être estimée à partir de la capacité de l'individu à adopter le comportement exigé par les demandes de la tâche (Lewis-Evans & Rothengatter, 2009). Plus la situation est complexe, et plus les demandes de la tâche sont importantes, entraînant une hausse de la difficulté (Di Stasi, Renner, Staehr, Helmert, Velichkovsky, Cañas, Catena, & Pannasch, 2010). Fuller (2005) propose ainsi une théorie générale du comportement du conducteur basée sur le modèle d'interface tâche-capacité. D'après ce modèle, différents niveaux de difficulté de la tâche sont dus à l'interaction dynamique entre les déterminants des exigences de la tâche et les capacités du conducteur à réaliser la tâche. La théorie stipule que le conducteur adapte son comportement en choisissant sa vitesse de conduite afin de maintenir un niveau de difficulté de la tâche adapté à ses capacités et nécessaire pour maintenir de bonnes performances. Des exigences de la tâche estimées élevées par le conducteur l'inciteront donc à réduire sa vitesse afin d'en abaisser la difficulté.

2.1.2. Surcharge : impact de la situation de conduite et de l'expérience

Le concept de charge de travail correspond à la quantité de ressources mentales mobilisées par un sujet lors de la réalisation d'une tâche. Il existe des tâches automatisées qui ne demandent pas d'effort mental, des tâches contrôlées simples qui n'exigent qu'un minimum d'effort, des tâches complexes qui peuvent aller jusqu'à générer un effort incompatible avec celui que l'individu est capable de fournir. Ainsi, la même tâche peut donner lieu chez un débutant à une activité contrôlée coûteuse en effort mental et, chez une personne pourvue d'une longue expérience de conduite, à une activité automatisée sans coût mental. Par conséquent, durant les situations très complexes, une activité peu automatisée engendre une forte mobilisation des ressources mentales pour répondre aux exigences de la tâche (De Waard, 1996) et le niveau de charge de travail peut ainsi excéder les ressources disponibles nécessaires pour la réaliser (Hockey, 1997) jusqu'à atteindre un niveau de surcharge et un effort demandé trop élevé par rapport aux capacités cognitives de l'individu.

Parmi les facteurs liés à la performance, le haut risque des conducteurs novices est d'ailleurs fréquemment attribué au manque d'automatisation des routines de conduite (De Craen et coll., 2008), ce qui provoque un travail mental plus important pour une même situation (Patten et coll., 2006).

Le modèle de Meister (1976) permet d'établir la relation entre des situations plus ou moins demandeuses (niveau d'exigence) et les performances, par l'intermédiaire de la charge de travail (cf. Figure 1). Les performances, représentées par la vitesse ainsi que la précision dans l'accomplissement de la tâche, sont très bonnes en région A (demandes moyennes) puis diminuent en région B (demandes élevées) pour atteindre un très faible niveau en région C (demandes très élevées). Ce modèle peut être complété par une région D pour Désactivation correspondant à de très faibles demandes lors de tâches monotones (e.g. longues autoroutes) qui, de par l'ennui qu'elles provoquent, réduisent les capacités de l'individu. La région A peut se diviser en trois parties en fonction de l'effort investi (De Waard, 1996). En A1, la monotonie des tâches favorise un traitement automatique de l'information mais l'individu peut fournir un effort compensatoire important (relié à l'état) afin de rester vigilant et les performances peuvent être maintenues malgré la hausse de la charge de travail. En A2, l'augmentation des demandes (e.g., routes rurales) permet de maintenir des performances avec peu d'effort. En A3, la forte augmentation des demandes (e.g., routes urbaines) requiert un effort mental important (relié à la tâche) pour traiter le grand nombre d'informations de manière contrôlée.

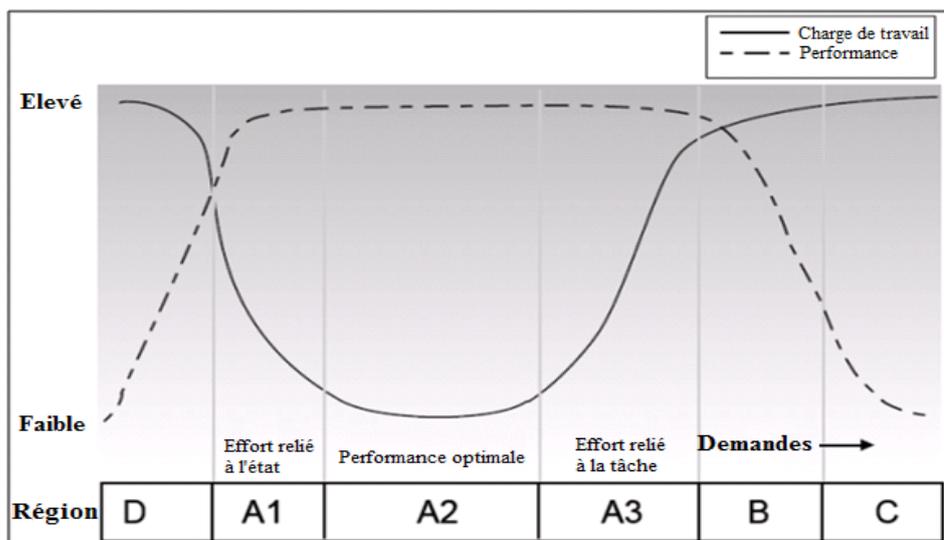


Figure 1. Performances et charge de travail en fonction des demandes.

Ainsi, en région A, l'effort investi permet de maintenir de bonnes performances. Dans ces situations moyennement complexes, une certaine élasticité dans la disponibilité des ressources permet probablement d'augmenter leur mobilisation malgré l'augmentation de la charge de travail (Kahneman, 1973). De plus, des stratégies compensatoires peuvent être mises en place dans le but de réduire le niveau de charge et de maintenir de bonnes performances. Par exemple, les conducteurs peuvent réduire leur vitesse pour avoir le temps de traiter l'ensemble des informations nécessaires à leur déplacement. Cette stratégie s'avère efficace car elle n'entraîne pas de détérioration des performances (Cnossen, Rothengatter, & Meijman, 2000), voire même une amélioration des performances malgré la hausse de la charge (Brookhuis, De Vries, & De Waard, 1991 ; De Waard, Van der Hulst, & Brookhuis, 1999).

Les régions D et C représentent une surcharge de travail : la charge de travail est évaluée comme trop élevée concernant l'effort à fournir et entraînant une dégradation des performances. En région D, la difficulté de la tâche est trop importante pour que l'individu puisse fournir un effort suffisant pour la réaliser. En région C, les demandes de la tâche sont trop élevées et toutes les informations ne peuvent pas être prises en considération simultanément (Kahneman, 1973 ; Posner, 1978).

2.1.3. Etats internes modulant la surcharge

D'après le modèle d'activation de Thayer (1986), l'individu se situe sur un continuum d'énergie avec une activation physiologique allant de l'excitation au sommeil profond en fonction des rythmes circadiens, de l'activité cognitive, de l'exercice physique et de la valence affective. L'activation générale se réfère ainsi à la libération d'énergie de l'organisme et constitue l'état interne d'un individu.

La vigilance subjective correspond au message entre le système circadien et la part de conscience de l'individu. Ce dernier peut ainsi percevoir différents états de vigilance qui varient le long d'un continuum allant du sommeil aux états de veille active, en passant par des états de veille diffuse et de veille attentive¹.

Dans le modèle de Thayer, la tension représente la composante physiologique de l'anxiété et présente un lien étroit avec la vigilance. Lors de la réalisation d'une tâche moyennement demandeuse, la tension et la vigilance augmentent (corrélation positive), avec un niveau d'activation générale relativement moyen. Cependant, lorsque les demandes de la tâche sont élevées et exigent une forte libération d'énergie générale, la corrélation entre la vigilance et la tension devient négative. En fonction du type de tâches et des individus, l'activation de l'organisme dédiée à maintenir un haut niveau de vigilance laisse peu de ressources énergétiques pour la tension. Et inversement, si la libération d'énergie est déployée pour un haut niveau de tension, l'énergie investie pour la vigilance est moindre.

Certaines situations complexes peu communes et demandant une grande flexibilité du comportement seraient davantage anxiogènes que d'autres. Par exemple, les situations avec de mauvaises conditions climatiques ainsi que celles comprenant des interactions avec d'autres conducteurs provoquent une hausse subjective d'anxiété (Hill & Boyle, 2007). Les situations complexes deviennent anxiogènes à partir du moment où l'individu les évalue comme dépassant ses ressources, i.e. ses capacités à y faire face. Un haut niveau d'anxiété peut alors augmenter le nombre d'accidents sur la route (Dula, Adams, Miesner, & Leonard, 2010), notamment chez les jeunes conducteurs (Sobel & Underhill, 1976). En résumé, les situations fortement anxiogènes augmentent le niveau subjectif d'anxiété malgré la mise en place de stratégies compensatoires. Un faible niveau d'anxiété est favorable à l'amélioration des performances (Courbe en U inversé de Yerkes & Dodson, 1908). À l'inverse, un niveau très élevé d'anxiété détériore les performances de conduite réelles ou estimées. Il est important de noter qu'il existerait une relation bidirectionnelle entre l'anxiété et la charge de travail. Les théories révèlent en effet que l'anxiété peut augmenter la charge de travail investie pour réussir la tâche, et à l'inverse, la charge de travail peut générer de l'anxiété avec des inquiétudes pour réussir la tâche.

¹ Le concept de vigilance est à dissocier des concepts de fatigue et d'attention. En effet, la fatigue est particulièrement reliée à une tâche, qu'elle soit physique et reliée au travail musculaire, ou mentale et l'attention se différencie de la vigilance en étant définie comme une instance de contrôle et d'orientation de l'activité.

Les liens entre la vigilance des conducteurs et la sécurité routière font depuis longtemps l'objet d'investigations qui offrent un faisceau convergent de connaissances incitant à attribuer à l'hypovigilance un rôle important dans les accidents routiers. Ainsi, les accidents qui se produisent pendant les périodes physiologiques de somnolence représenteraient 36,1 % des accidents mortels et 41,6 % de l'ensemble des accidents de la route (Philip et coll., 2001).

Par ailleurs, certaines tâches et situations environnementales sont plus à même que d'autres de modifier le niveau d'activation du conducteur. Une attention soutenue est en effet difficile à maintenir quand les conditions environnementales sont ennuyeuses ou simplement monotones alors que des tâches plus complexes, variables et courtes, ou un environnement plus riche pourraient provoquer la mise en œuvre de processus compensatoires à la baisse de vigilance (Schneider et Shiffrin, 1977 ; Meskali et coll., 2009). Par exemple, conduire peut devenir une activité quasi automatique après une longue période sur autoroute, notamment en cas de trafic fluide. Ce type d'automatisation de la tâche de conduite est également favorisé par des trajets nocturnes ou des trajets familiers au conducteur et, dans ces conditions d'environnement pauvre et répétitif, l'assoupissement peut survenir. À l'inverse, d'autres tâches relativement complexes, comme le suivi de véhicule ou la conduite en milieu urbain demandent une attention plus soutenue et dépendent d'un traitement de l'information plus contrôlé, moins susceptible d'entraîner une baisse d'activation et plus à même de susciter la mise en œuvre de mécanismes compensatoires (Chiron et coll., 2008).

Toutefois, d'après le modèle de courbe en U renversé d'Ansseau et Timsit-Berthier (1987 ; in Hadj-Mabrouk, 2001), le niveau de performance augmente avec celui de la vigilance jusqu'à un optimum, au-delà de cet optimum l'augmentation de la vigilance entraîne au contraire une baisse de la performance (Cf. Figure 2). La loi de Yerkes-Dodson concernant le lien entre niveau de performance et niveau de vigilance (Wickens & Hollands, 2000) montre également qu'en fonction de la tâche à réaliser, un niveau trop bas ou trop haut de la vigilance peut être dommageable. L'excès de vigilance que représentent le stress ou l'hyperexcitation a un pouvoir de dégradation plus rapide sur les activités complexes que sur les activités les plus simples. Il y a donc un niveau optimal de vigilance pour chaque type de tâche réalisée et la dégradation de la performance peut être liée à de l'hypovigilance ou de l'hypermotivation.

La charge de travail est ainsi également en lien avec la vigilance. Une augmentation de cette charge entraîne en effet une hausse de la vigilance mais la tendance s'inverse lorsque les tâches difficiles et précises entraînent une surcharge (Ansseau & Timsit-Berthier, 1987), avec dans ce cas, une diminution de la vigilance (Brookhuis et coll., 2003 ; in Brookhuis & De Waard, 2010).

Enfin, les variations de vigilance affectent les performances de conduite différemment en fonction de l'expérience. Une étude a ainsi montré que les conducteurs novices avaient une forte hausse subjective de somnolence à 3h du matin, qui ralentissait la perception du danger, contrairement aux expérimentés dont la hausse mineure subjective de sommeil n'affectait pas les temps de réaction (Smith et al., 2009).

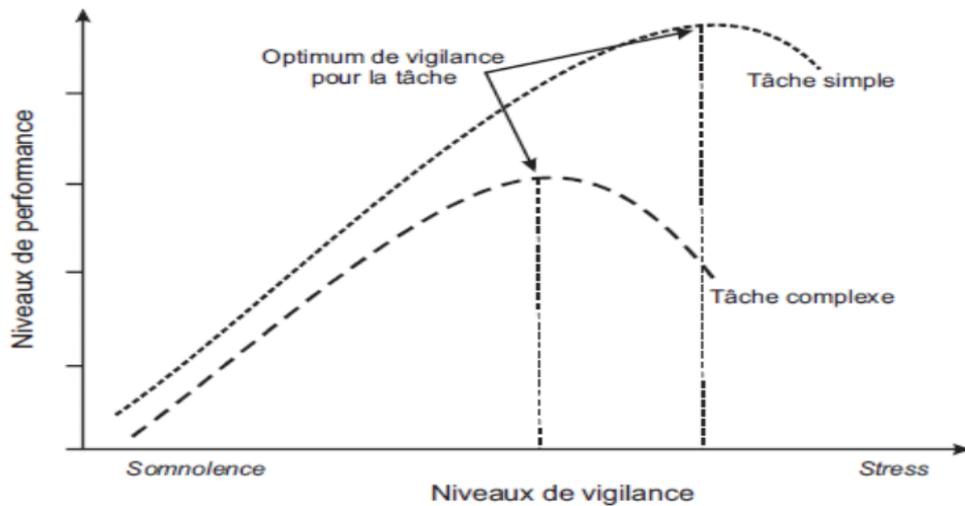
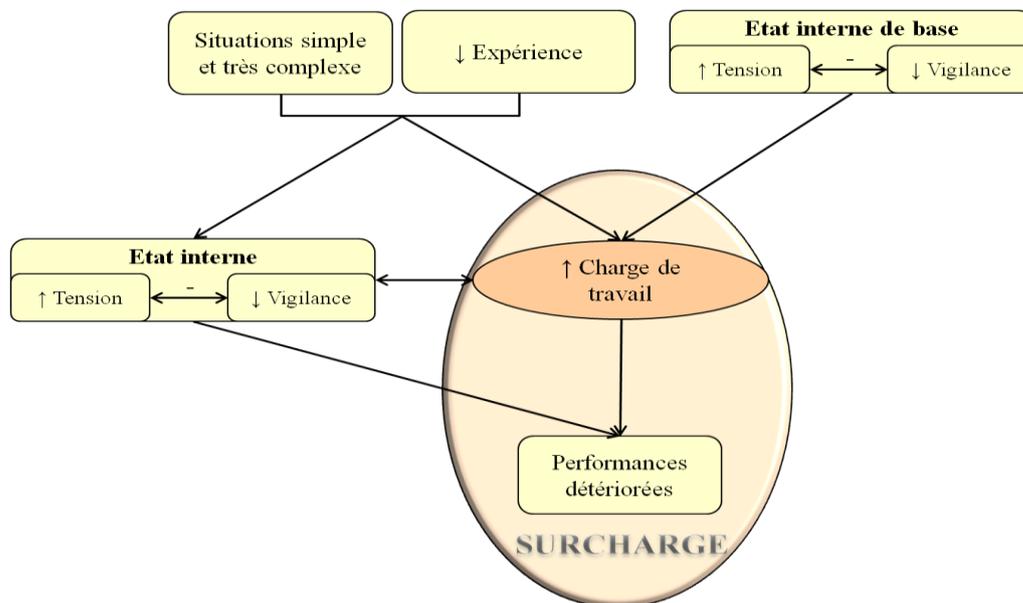


Figure 2. Relation entre vigilance et performance.

2.1.4. Problématique

L'état de la littérature permet de comprendre dans quelles mesures l'interaction entre les différents facteurs évoqués ci-dessus constitue une synergie accidentogène. À partir des théories et des études énoncées, le modèle suivant pourrait ainsi rendre compte des liens entre les facteurs accidentogènes chez les jeunes conducteurs (Figure 3).



Note : ↑ = hausse ; ↓ = baisse ; - = corrélation négative.

Figure 3. Liens entre différents facteurs accidentogènes : complexité de la situation, expérience, charge de travail, état interne et performances.

D'après le modèle d'activation de Thayer (1986), la corrélation entre les niveaux de tension et de vigilance qui composent l'état interne est respectivement positive ou négative pour une faible ou forte énergie libérée, cet état interne module la surcharge de travail.

Ainsi, un état interne de base libérant une importante énergie (corrélation négative entre tension et vigilance) devrait favoriser la hausse de la charge de travail jusqu'à ce que cette dernière entraîne des dégradations de performances, révélant ainsi une surcharge (Figure 3).

En situations simples et très complexes (coûteuses en énergie), et notamment avec le manque d'expérience, un faible niveau de vigilance et un haut niveau d'anxiété (associé à la tension) provoquent des détériorations de performances de manière directe et indirecte via une hausse de la charge de travail. L'état interne caractérisé par un haut niveau d'activation (forte libération d'énergie) peut donc augmenter la charge de travail jusqu'à une détérioration de performance révélant une surcharge de travail. Réciproquement, la hausse de la charge, induite par les situations simples et très complexes et liée à un manque d'expérience, peut augmenter le niveau d'activation de l'état interne en diminuant la vigilance (Smit et al., 2004 ; Brookhuis et al., 2003 ; Falzon & Sauvagnac, 2004) et en générant de l'anxiété (Wells & Matthews, 1996 ; in Fairclough et al., 2006).

Une expérimentation a donc été menée afin de valider ce modèle de manière empirique. Elle portait sur l'influence de la complexité de la situation et de l'expérience de conduite sur les niveaux subjectifs et physiologiques de la charge de travail, de la tension et de la vigilance et sur les performances. Les liens entre ces facteurs ont été observés en absence vs. en présence d'évènements imprévus (traversée de la chaussée par un piéton).

2.2. Partie expérimentale

2.2.1. Les participants

Trente-deux jeunes conducteurs (20 hommes et 12 femmes) étaient répartis en deux groupes en fonction de leur expérience de conduite : 16 conducteurs novices âgés de 18 ans ($M = 18$, $SD = 0$) ayant obtenu leur permis de conduire dans les deux derniers mois avec un Apprentissage Traditionnel (AT), et 16 conducteurs âgés de 21 ans ($M = 21$, $SD = 0$) arrivant à plus ou moins 3 mois de la Fin des 3 ans de Permis Probatoire (FinPB). Les participants ne devaient présenter aucun problème de santé qui puisse interférer avec les données physiologiques étudiées. Chaque participant signait un formulaire de consentement libre et éclairé et recevait une gratification de 60 € pour sa participation à l'expérience. Le protocole expérimental a été approuvé par le Comité d'Ethique et de Recherche (CERB) de l'IFSTTAR, ainsi que par le Comité de Protection des Personnes (CPP) Sud Méditerranée I.

Avant l'expérience proprement dite, les participants avaient un entraînement qui leur permettait de se familiariser avec les commandes du simulateur.

2.2.2. Protocole expérimental

L'expérience répond au plan expérimental suivant : $S16 < G2 > * E3$

G2 : deux groupes de participants (voir ci-dessus).

S16 : 16 participants par groupe.

E3 : 3 scénarii (complexité simple, moyenne et forte ; Figure 4). Ces scénarii impliquent une charge de travail plus ou moins élevée et ont été développés afin d'établir les relations entre charge de travail objective, charge de travail perçue, niveaux objectifs de tension et de

vigilance, tension et vigilance perçues. L'ordre de passation des scénarii était contrebalancé afin d'éviter un effet d'ordre.

Complexité simple : ligne droite.



Complexité moyenne : courbes de 600 m de long et de 300 m de rayon, séparées par des sections de ligne droite.



Complexité forte : 2 fois plus de courbes que dans le scénario de complexité moyenne, courbes de 300 m de long et de 120 m de rayon séparées par des sections de ligne droite, trafic routier venant en sens inverse.



Figure 4. Les différents scénarii utilisés dans l'expérience

Chaque scénario inclut des situations accidentogènes inspirées des Études Détaillées d'Accidents (EDA, Salon-de-Provence). En effet, des piétons surgissent de la droite de la chaussée et traversent devant le véhicule du participant. Les piétons sont cachés derrière les arbres, ce qui permet de privilégier l'effet de surprise lié à leur apparition. Ils surgissent alors que le temps pour les éviter est réduit. Ce temps a été déterminé à partir de reconstitutions de données d'accidents réels (EDA) mais il permet d'éviter le choc avec le piéton. Il est constant dans tous les scénarios quelle que soit la vitesse des sujets. Il y a trois événements piétons

dans chaque scénario, disposés aléatoirement sur le circuit. Le comportement des participants était enregistré en continu pendant la tâche de conduite.

L'échelle de Thayer a été remplie par les participants avant et après chaque circuit. Elle va permettre d'estimer les niveaux subjectifs de vigilance et de tension. Le NASA-TLX a été adapté à l'expérimentation, légèrement variable pour chaque scénario et a été rempli après chaque scénario. Il permet d'estimer le niveau subjectif de charge de travail.

Les mesures de vigilance objective (EEG), de charge de travail (fréquence cardiaque) et de tension (réponse électrodermale) ont été mesurées à l'aide d'un appareil BIOPAC (voir Figure 5). Des filtres digitaux à réponse impulsionnelle infinie (IIR) sont appliqués aux différentes mesures afin d'éliminer les artefacts les plus importants. Une période d'enregistrement des variables physiologiques au repos (6 mn yeux ouverts et 5 mn yeux fermés) précède et succède aux trois situations de conduite (simple, moyennement complexe et très complexe).

Les variables dépendantes recueillies sont les suivantes :

- scores aux échelles d'évaluation subjective (Thayer et NASA-TLX),
- mesures objectives de vigilance (EEG), l'indice du niveau de vigilance est calculé par le rapport des ondes (alpha + thêta) / beta, un rapport élevé traduisant un faible niveau de vigilance (Lal & Graig, 2001 ; Ryu et al., 2007). En effet, l'onde Beta indique un niveau de vigilance élevée, notamment dû à la difficulté de la tâche, alors que les ondes Alpha et Thêta reflètent respectivement des niveaux faibles et très faibles de vigilance. Le rapport (alpha + thêta) / beta donne ainsi une bonne approximation du niveau de vigilance des conducteurs.
- mesures objectives de charge de travail (fréquence cardiaque). La hausse de la charge de travail est caractérisée par l'accélération de la fréquence cardiaque (FC) (Gabaude, Baracat, Jallais, & Fort, 2012 ; Brookhuis & De Waard, 2010). La moyenne de la FC se réfère au nombre de battements par minute. Nous avons calculé la FC différentielle ou incrémentale qui précise la différence de FC entre la période de repos avant la conduite et la FC pendant la période de conduite. Une augmentation de ce rapport indique alors une augmentation de charge de travail.
- mesures objectives de tension (réponse électrodermale), la tension représente la composante physiologique de l'anxiété. Les deux indicateurs d'anxiété les plus appropriés semblent être l'activité électrodermale moyenne qui reflète le niveau global d'anxiété durant une tâche et la réponse électrodermale qui apparaît spécifiquement face à un évènement anxigène (Cottrell & Barton, 2012 ; Schmidt-Daffy, 2012). L'activité électrodermale moyenne en microsiemens (μS) est obtenue à partir du signal tonique.
- mesures objectives de conduite (vitesse moyenne, variations de vitesse, position latérale moyenne, variations de position latérale, nombre d'accidents avec les piétons, temps de réponse et stratégies d'évitement mises en œuvre pour éviter le piéton : freinage, évitement par déport latéral et combinaison freinage et déport). Les variables longitudinales et transversales de performance de conduite étudiées ici sont celles les plus fréquemment étudiées dans ce type d'expérience, elles ont été démontrées sensibles au niveau de charge de travail et de vigilance (Brookhuis & De Waard, 2010). Les manœuvres d'évitement mise en œuvre pour éviter un piéton ont été démontrées sensibles au niveau d'expérience des conducteurs (Meskali et coll., 2009).



Figure 5. Participant appareillé pour participer à l'expérience.

2.2.3. Analyses statistiques

Durant les portions sans piéton, les données physiologiques sont analysées en prenant en compte le différentiel de fréquence cardiaque moyenne (charge de travail objective), d'activité électrodermale moyenne (tension objective) et du ratio EEG («(alpha + theta) / beta», vigilance objective) entre les périodes de repos et d'activité de conduite. Durant les portions avec piétons, les données physiologiques prises en compte sont le différentiel de fréquence cardiaque moyenne (charge de travail objective), l'amplitude des pics de réponse électrodermale (tension objective) et le différentiel du ratio EEG (vigilance objective).

Pour les portions avec et sans piétons, une analyse de l'effet simple de l'expérience sur chacune des variables dépendantes a été effectuée, au moyen de t de Student pour groupes indépendants.

L'ensemble des effets indirects possibles a été testé avec le test de Sobel. Le test de Sobel permet de tester la signification d'un effet de médiation, c'est-à-dire de tester la relation entre une variable indépendante et une variable dépendante, qui est supposée être dû en partie à l'influence d'une 3ème variable (la médiatrice), la variable indépendante ayant alors un effet indirect. Cela a pour conséquence que lorsque la variable médiatrice est incluse avec la variable indépendante dans un modèle d'analyse de régression, l'effet de la variable indépendante est réduit. Le test de Sobel est ainsi une méthode pour déterminer si la réduction de l'effet de la variable indépendante, après inclusion de la médiatrice dans le modèle, est significative et donc si l'effet de la médiatrice est significatif.

Ensuite, des analyses de régression polynomiale de second ordre (pas à pas descendante) sur les données ont été menées en enlevant l'effet simple de l'expérience, et tout en préservant les effets d'interaction entre l'expérience et les autres variables indépendantes. La part de variance de l'effet simple de l'expérience ne se reflète donc pas dans l'analyse de régression polynomiale, mais son impact est tout de même en partie appréhendé avec les effets d'interactions. L'ensemble des résultats n'est pas détaillé ici, les effets simples significatifs ne sont pas présentés lorsqu'ils apparaissent en interaction avec la situation, l'expérience ou encore les stratégies adoptées par les conducteurs pour éviter les piétons (variables catégorielles), ou lorsqu'ils apparaissent en interaction avec ces variables

catégorielles sans pour autant avoir d'effet sur la variable dépendante en fonction des modalités de la variable catégorielle. Les analyses post-hoc étaient réalisées avec des t de Student pour groupes indépendants pour des comparaisons par paires, et avec des régressions linéaires simples pour l'effet d'une variable sur une autre dans chaque condition.

Afin d'identifier le seuil de surcharge à la fois en fonction de l'expérience et de la situation, des analyses complémentaires ont été menées. Ainsi, des régressions simples de l'effet de la charge de travail subjective et du différentiel de fréquence cardiaque moyenne ont été réalisées sur les temps de réaction et le nombre de collisions, pour chaque groupe dans chaque situation (voir Annexe 1).

La significativité statistique de l'ensemble des analyses était fixée à $p < .05$. Afin de clarifier la lecture des résultats, seules les analyses donnant lieu à des résultats significatifs seront présentées ici. D'autre part, certains résultats peuvent apparaître plusieurs fois suite aux nombreuses analyses effectuées. Notamment, les analyses de régression polynomiales mettent en évidence des effets simples déjà relevés par les autres tests, dans ce cas ces effets ne seront notés qu'une seule fois.

2.2.4. Résultats

2.2.4.1. Portions sans piétons

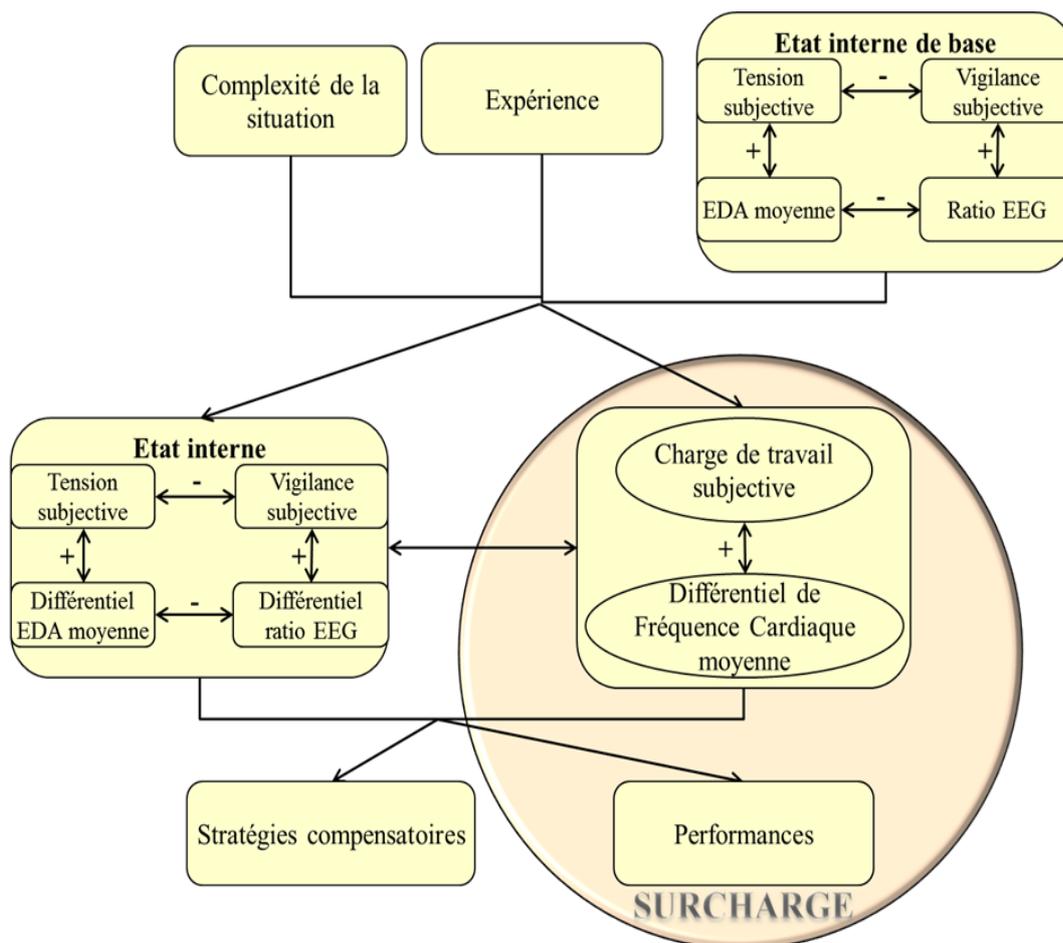
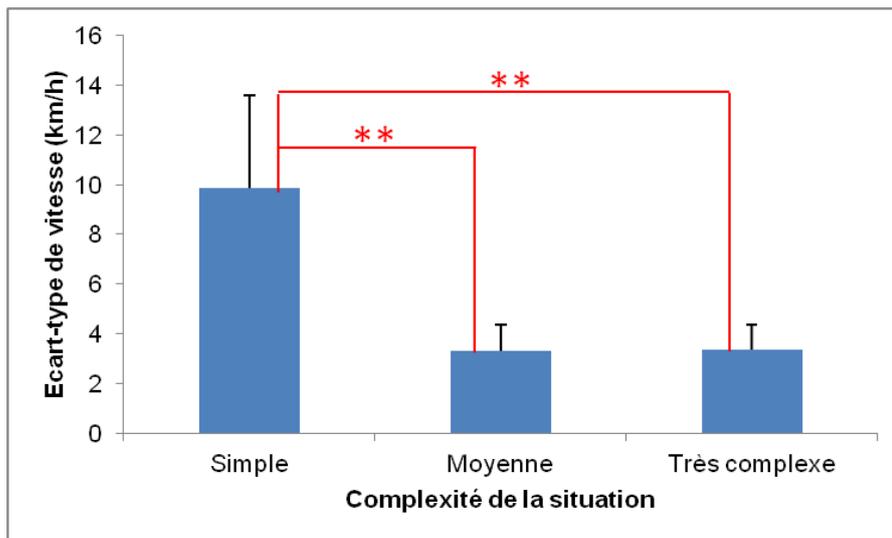


Figure 6. Variables analysées dans les portions sans piétons.

Le modèle exposé dans la problématique a été testé et nous obtenons le modèle présenté sur la Figure 6. Les résultats statistiques ne seront pas présentés de manière détaillée, ils sont disponibles en annexe. Deux axes vont être développés. Seront présentés dans un premier temps les effets des facteurs expérimentaux (expérience de conduite, complexité de la situation) et de l'état interne avant la conduite sur la charge de travail et les performances, et ensuite l'effet de ces mêmes facteurs et de la charge de travail sur l'état interne des conducteurs après la session de conduite.

La charge de travail, et dans un second les performances de conduite, est le résultat d'une interaction entre l'état interne (tension et vigilance) et le niveau de complexité de l'environnement. Ainsi, lorsque l'état interne est caractérisé par une libération importante d'énergie (tension faible et vigilance élevée) et que la situation de conduite se complexifie, la charge de travail augmente et les performances de conduite sont dégradées (Figure 7).



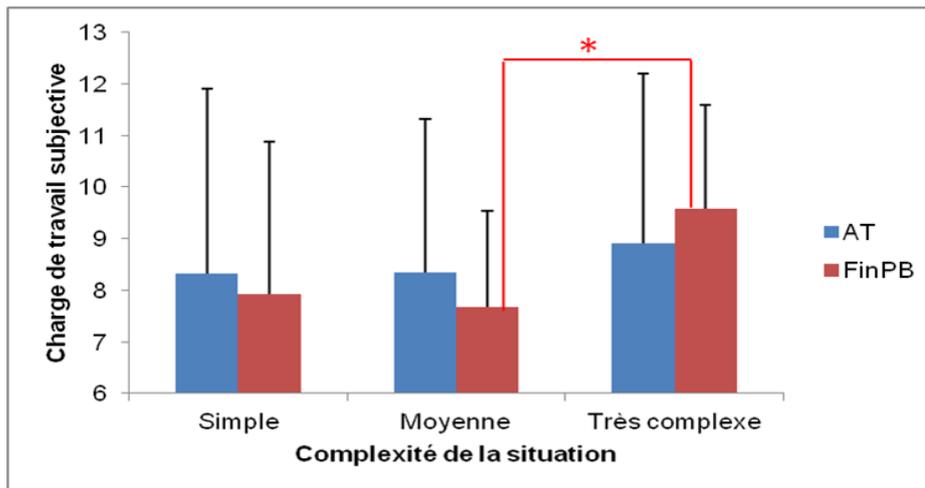
Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

Figure 7. Ecart-type de vitesse en fonction de la complexité de la situation

Les résultats obtenus montrent également que l'expérience de conduite module les effets décrits précédemment. En effet, la charge de travail est significativement plus élevée pour les conducteurs novices (AT) que pour les conducteurs en fin de permis probatoire (FinPB, Tableau 1). Ces résultats témoignent donc de l'effort supplémentaire que les novices doivent fournir pour effectuer la tâche de conduite. Ils sont par ailleurs modulés par la complexité de la situation. Ainsi, si les niveaux de charge de travail des novices (AT) ne varient pas en fonction de la complexité de la situation, probablement car la tâche de conduite leur apparaît difficile dans tous les cas, ceux des conducteurs en fin de permis probatoire (FinPB) sont plus élevés dans les situations complexes que dans les situations moyennement complexes (Figure 8).

Tableau 1. Charge de travail objective (différentiel de fréquence cardiaque moyenne) en fonction de l'expérience de conduite et de la complexité de la situation.

	Simple <i>M (SD)</i>	Moyenne <i>M (SD)</i>	Très complexe <i>M (SD)</i>
AT	3.12 (7.92)	4.10 (6.72)	7.20 (10.49)
FinPB	-0.20 (5.09)	.89 (9.67)	-4.04 (5.72)



Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

Figure 8. Charge de travail subjective en fonction de l'expérience de conduite et de la complexité de la situation.

Les analyses statistiques effectuées nous ont permis également de montrer que les facteurs expérimentaux, expérience de conduite et complexité de la situation, en interaction avec l'état interne initial (avant la session de conduite) des conducteurs déterminent l'état interne final (après la session de conduite, Tableau 2).

Tableau 2. Différentiel du ratio EEG (vigilance objective) en fonction de l'expérience de conduite et de la complexité de la situation.

	Simple <i>M (SD)</i>	Moyenne <i>M (SD)</i>	Très complexe <i>M (SD)</i>
AT	15.46 (27.72)	13.44 (32.86)	9.21 (14.47)
FinPB	-47.29 (123.88)	6.05 (11.06)	4.06 (5.94)

Par ailleurs, nous avons également observé que la charge de travail, influencée par l'état interne initial des conducteurs, a elle-même une influence sur l'état interne final. Les relations complexes et en boucle relevées, conformes au modèle présenté, ont elles-mêmes un effet sur les performances de conduite en modifiant les paramètres de position et de vitesse du véhicule.

2.2.4.2. Portions avec piétons

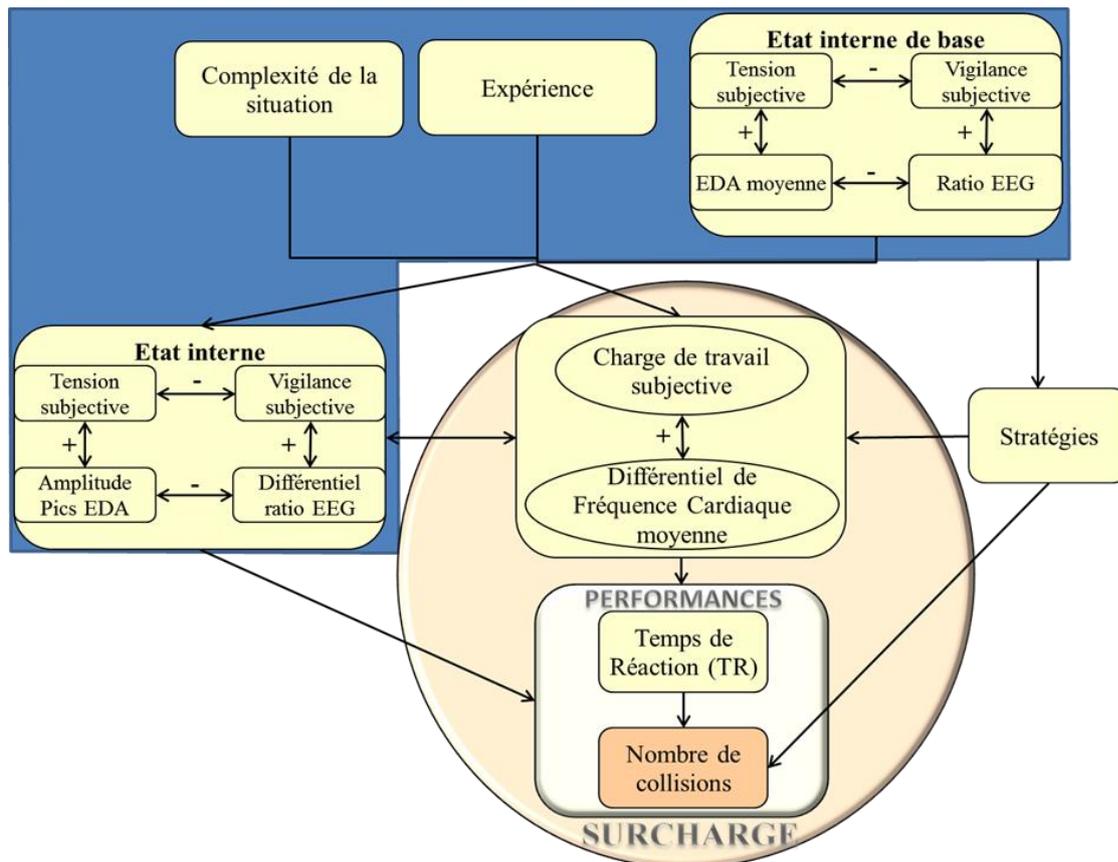


Figure 9. Variables analysées dans les portions avec piétons.

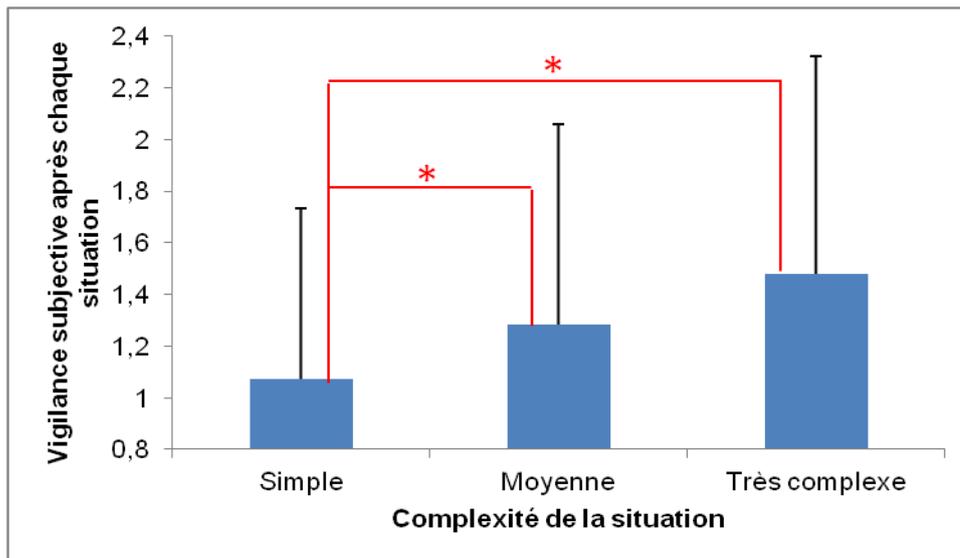
Les mêmes facteurs que précédemment pour l'étude des portions sans piétons ont été pris en compte dans les analyses. Les indices de performances sont cependant différents, puisqu'ont été pris en considération les temps de réaction après l'apparition du piéton sur la voie, ainsi que le nombre de collisions avec des piétons. Par ailleurs, les stratégies d'évitement des piétons ont également été étudiées. De manière générale, les analyses ont mis en évidence un certain nombre d'effets directs et indirects de l'état interne du conducteur et des facteurs expérimentaux sur la charge de travail confirmant la validité du modèle proposé p. 10. De plus, les effets de l'état interne du conducteur se traduisent de manière directe et indirecte sur les performances de conduite.

Ainsi, une tension élevée, malgré une vigilance également élevée, dégrade les performances, en augmentant le nombre de collisions avec les piétons, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un allongement des temps de réaction. Cet état initial de tension entraîne d'autre part une augmentation de charge de travail lors de l'apparition des piétons. La hausse de charge augmente alors le nombre de collisions, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un allongement des temps de réaction. Par ailleurs, elle augmente également en retour la tension finale (après la session de conduite).

Ces résultats sont cependant modulés par la complexité des situations. En effet, nous observons une augmentation de la vigilance et de la tension après la session de conduite d'autant plus importante que la situation était complexe. Des similitudes d'états sont à noter entre situations moyennement complexes et très complexes. À l'inverse, les situations simples

se singularisent, probablement du fait de leur monotonie, puisque dans ce cas la vigilance subjective après la conduite est faible, de même que la tension objective.

D'autre part, globalement, dans les situations complexes, plus la vigilance est élevée, plus le nombre de collisions augmente. Dans ces situations complexes, une tension initiale élevée entraîne une charge de travail élevée qui, à son tour, allonge les temps de réaction et augmente le nombre de collisions. La tension favorise donc la surcharge de travail. C'est ainsi en situation complexe que l'état interne initial du conducteur a le plus d'influence sur les performances.



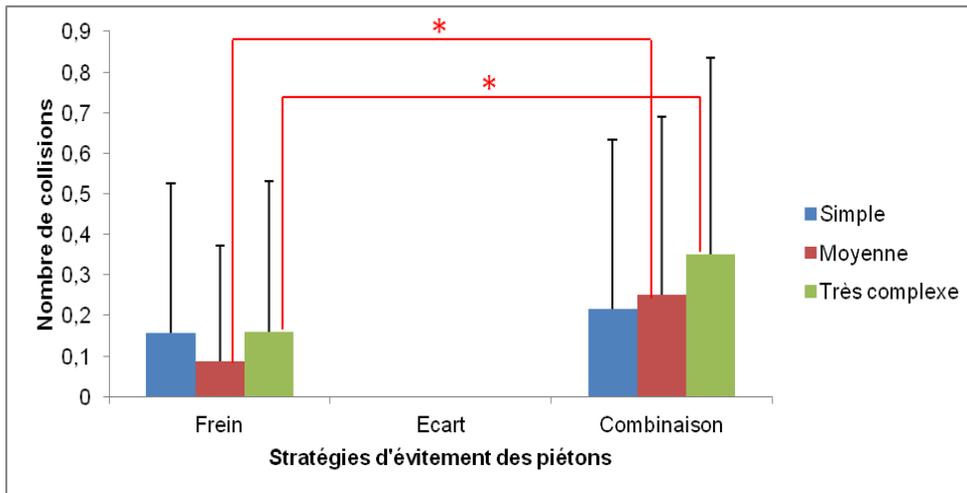
Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

Figure 10. Vigilance subjective après la conduite en fonction de la complexité de la situation.

Ces résultats sont également modulés par les stratégies d'évitement mises en œuvre par les conducteurs. En effet, le nombre de collisions, plus élevé dans les situations complexes, est cependant différent en fonction de la stratégie d'évitement mises en œuvre. Ainsi, lors des situations complexes, le nombre de collisions est plus faible lorsque les conducteurs freinent plutôt que lorsqu'ils effectuent une combinaison freinage/écart (Figure 11).

Les résultats obtenus sont également modulés en fonction de l'expérience des conducteurs. Ainsi, les niveaux de vigilance et de tension sont plus élevés chez les conducteurs novices que chez les conducteurs en fin de permis probatoire (FinPB). Leur charge de travail est aussi plus élevée ce qui témoigne de l'effort supplémentaire qu'ils doivent fournir pour effectuer la tâche. Cette forte dépense énergétique les prédispose donc à la surcharge et à ses répercussions délétères sur la conduite : temps de réaction plus longs que ceux des conducteurs plus expérimentés et nombre de collisions avec les piétons plus élevé. Ces répercussions se font de manière directe ou indirecte comme en témoignent les résultats ci-dessous.

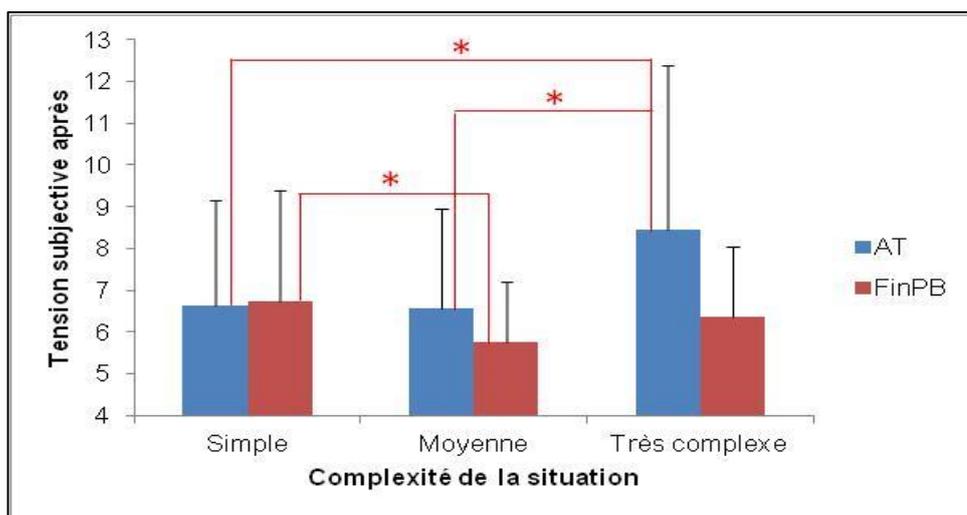
L'expérience de conduite a un effet sur le nombre de collisions via la charge de travail. Ainsi les jeunes conducteurs expérimentés ont un niveau de charge plus bas et des temps de réaction plus courts que les jeunes conducteurs novices, ce qui entraîne ensuite un nombre de collisions plus bas.



Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

Figure 11. Nombre de collisions en fonction de la complexité de la situation et de la stratégie d'évitement des piétons.

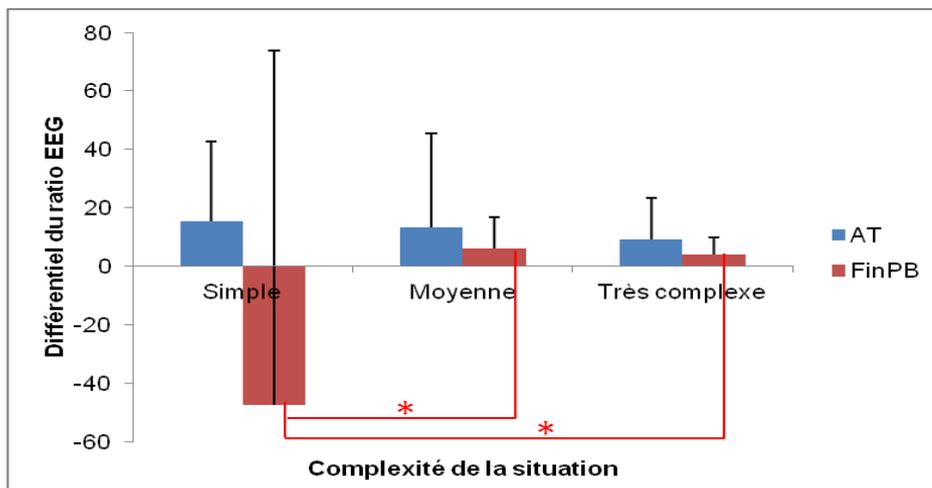
Par ailleurs, chez les conducteurs novices, nous observons qu'un faible niveau d'expérience est à l'origine d'un niveau élevé de tension initial (avant la conduite) qui entraîne un haut niveau de tension final (après la conduite) qui à son tour provoque un niveau élevé de charge de travail. De plus, un niveau élevé de tension chez les conducteurs novices, malgré un niveau initial de vigilance également élevé, provoque un niveau élevé de charge de travail. Cette charge de travail élevée provoque alors une dégradation des performances (surcharge), le nombre de collisions augmentant, soit directement soit par l'intermédiaire d'un allongement des temps de réaction. A contrario, lorsque les conducteurs novices présentent une augmentation de la vigilance avant et après chaque situation, mais que la tension n'est pas trop élevée, la charge de travail diminue. Ainsi lorsqu'ils s'estiment vigilants, l'effort fourni par les conducteurs novices pour effectuer la tâche de conduite est plus faible.



Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

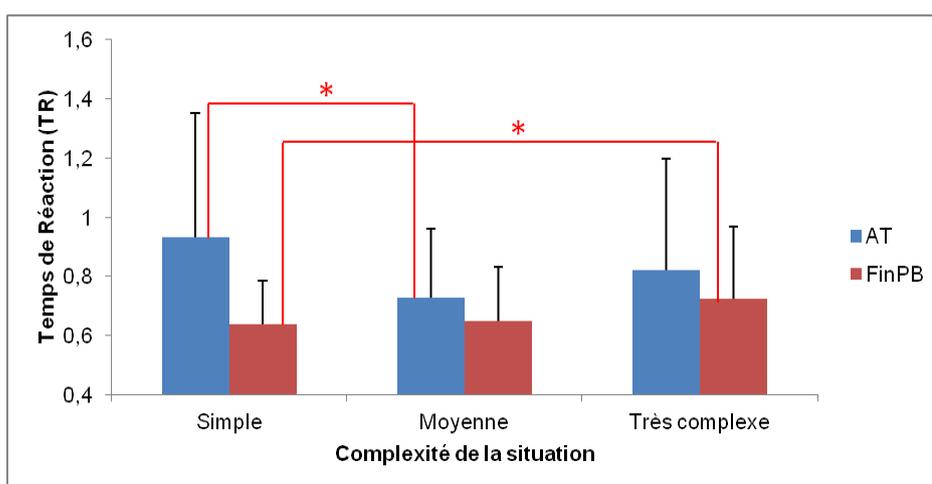
Figure 12. Tension subjective après chaque situation en fonction de l'expérience de conduite et de la complexité de la situation.

On observe également une interaction entre l'expérience de conduite et la complexité de la situation sur l'état interne des conducteurs, la charge de travail et les performances qui en résultent. Ainsi, la tension des novices après la conduite est plus élevée en situation très complexe qu'en situations simple et moyennement complexe, ce qui augmente la charge de travail (Figure 12). Seuls les conducteurs en fin de permis probatoires présentent des différences de leur état interne en fonction de la complexité de la situation. Ainsi, en situation simple comparativement aux situations plus complexes, la vigilance est plus faible (Figure 13), et la tension et la charge de travail plus élevées. Par ailleurs, la hausse de charge de travail augmente leurs temps de réaction en situation très complexe. Bien que le nombre de collisions des conducteurs FinPB avec les piétons soit relativement faible, un niveau de tension initial élevé entraîne directement leur augmentation. Chez les conducteurs novices, nous observons des temps de réaction plus élevés en situation simple comparativement à une situation moyennement complexe (Figure 14).



Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

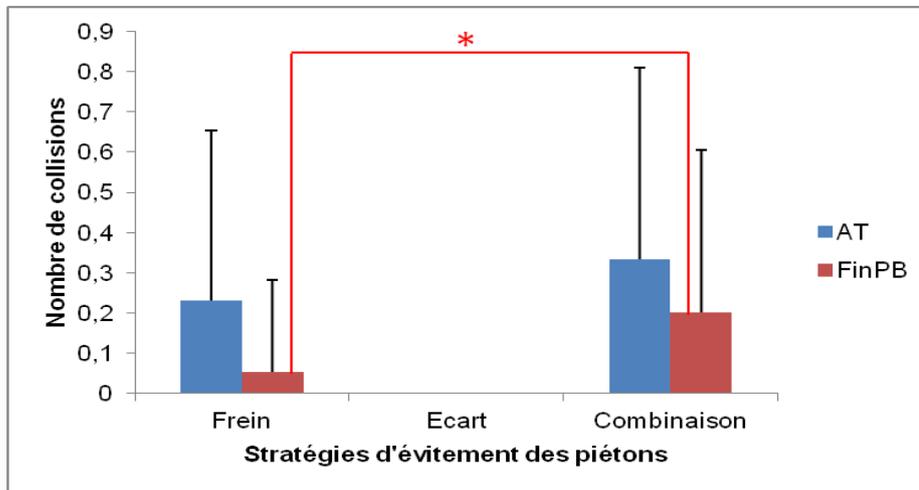
Figure 13. Vigilance objective (différentiel du ratio EEG) en fonction de l'expérience et de la situation.



Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

Figure 14. Temps de Réaction (en s) en fonction de l'expérience de conduite et de la complexité de la situation.

Pour finir, certains résultats témoignent d'une interaction entre l'expérience de conduite et les stratégies d'évitement mises en œuvre pour expliquer les performances de conduite observées. Ainsi, une tension initiale élevée des conducteurs FinPB entraîne un nombre élevé de collisions. Leur nombre de collisions est plus faible après un freinage qu'après une combinaison freinage/écart (Figure 15).



Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

Figure 15. Nombre de collisions en fonction de l'expérience de conduite et de la stratégie d'évitement des piétons.

2.3. Discussion et conclusion de la première expérience

L'hypothèse était qu'en situations simple et très complexe, la hausse de charge de travail subjective et objective devait entraîner une dégradation des performances, en particulier pour les conducteurs novices. Il s'agissait ainsi d'identifier le niveau d'expérience à partir duquel une surcharge de travail apparaissait. De plus, l'état interne des participants (niveaux subjectif et physiologique de tension et de vigilance) devait moduler ces effets.

L'échelle de Thayer a permis d'estimer les niveaux subjectifs de vigilance et de tension avant et après chaque situation. Le NASA-TLX a permis d'estimer le niveau subjectif de charge de travail après chaque situation.

Dans les portions sans piétons, les mesures objectives de vigilance (ratio EEG « (alpha + theta) / beta »), de charge de travail (différentiel de fréquence cardiaque) et de tension (activité électrodermale moyenne) entre les périodes de repos et d'activité ont été analysées. Les mesures objectives de conduite prises en compte étaient la vitesse moyenne, les variations de vitesse, la position latérale et les variations de position latérale du véhicule sur la chaussée.

Dans les portions avec piétons, les données physiologiques prises en compte étaient le différentiel de fréquence cardiaque moyenne, l'amplitude des pics de réponse électrodermale et le différentiel du ratio EEG. Les données objectives de conduite étaient le nombre d'accidents avec les piétons, les temps de réponse et les stratégies d'évitement mises en œuvre pour éviter le piéton : freinage, évitement par déport latéral et combinaison freinage et déport.

Les analyses effectuées ont permis de constater l'adéquation du modèle proposé et de confirmer les effets de l'état interne du conducteur sur la charge de travail et les performances de conduite en fonction de la complexité de la situation d'une part et en fonction des deux groupes de conducteurs considérés (les novices AT et les conducteurs à la fin du permis probatoire) d'autre part aussi bien dans les portions sans qu'avec piétons.

Etats internes et charge de travail, répercussions sur la conduite

Une régulation mutuelle des états de vigilance, de tension et de charge de travail est observée, aussi bien dans les portions sans piétons que dans les portions avec piétons, et la charge de travail sera plus ou moins importante en fonction du niveau de vigilance et de tension des conducteurs avant la conduite (Galy, 2013 ; Galy, Cariou, & Mélan, 2012). En particulier, une vigilance faible associée à une tension élevée entraîne une charge de travail élevée, démontrant la compensation d'un faible niveau de vigilance par une augmentation de la tension telle que décrite dans le modèle de Thayer (1986). Le niveau d'activation nerveuse est maintenu, et permet à l'organisme de disposer des ressources nécessaires à l'exécution de la tâche. Cette mobilisation des ressources se manifeste par une augmentation de la fréquence cardiaque différentielle rendant compte d'une charge de travail objective importante. En retour, la charge de travail influence les niveaux de vigilance et de tension (Galy & Gaudin, 2014).

L'état interne du conducteur influence globalement les performances de conduite, que ce soit de manière directe ou indirecte. Ainsi, des niveaux élevés de tension, charge et vigilance provoquent une dégradation des performances (SDLP et SD élevés) dans les portions sans piétons et une augmentation du nombre de collisions avec les piétons, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un allongement des temps de réaction dans les portions avec piétons.

Le positionnement à gauche de la chaussée, limitant les possibilités de sortir de sa voie de circulation, pourrait compenser dans certains cas l'augmentation de vitesse ainsi que les variabilités de vitesse et de position latérale. Toutefois, une hausse de la tension, de la vigilance et de la charge de travail peut à l'inverse entraîner un positionnement du véhicule sur la droite de la chaussée, ou bien une diminution du nombre de collisions avec les piétons.

Les relations complexes et en boucle de l'état interne des conducteurs sont modulées par le niveau de complexité des situations et modifient globalement les performances de conduite.

Etats internes et charge en fonction de la complexité de la situation, répercussions sur la conduite

L'effet de la charge de travail sur l'état interne des conducteurs varie avec la complexité de la situation. Globalement, plus la situation est complexe, plus la vigilance est élevée provoquant une diminution de charge de travail. La tension est par ailleurs supérieure dans les situations les plus complexes favorisant la surcharge.

C'est dans les situations les plus complexes que les effets de l'état interne sur les performances sont les plus marquées. Ainsi, le niveau de vigilance après les situations simples est estimé inférieur à celui des deux autres situations, probablement du fait de la monotonie de cette situation dont le tracé est complètement rectiligne. Ceci semble être confirmé par le fait qu'un niveau élevé de vigilance avant la conduite y entraîne une augmentation de vitesse. Dans ces situations simples, une tension et une charge élevées sont associées par ailleurs à une baisse de stabilité de la trajectoire alors qu'une charge élevée augmente cette stabilité.

Toutes ces dimensions permettent alors d'expliquer les performances des conducteurs en fonction de la complexité de la situation à laquelle ils sont confrontés et de leur expérience de conduite.

Etats internes en fonction de la situation et de l'expérience : stratégies compensatoires

Les mesures objectives de charge de travail, de tension et de vigilance sont toujours supérieures pour les conducteurs novices que pour les conducteurs en fin de permis probatoire ce qui témoigne de l'effort supplémentaire que les novices doivent fournir pour effectuer la tâche de conduite. Cette forte dépense énergétique les prédispose donc à la surcharge et à ses répercussions délétères sur la conduite : temps de réaction plus longs que ceux des conducteurs plus expérimentés et nombre de collisions avec les piétons plus élevé. Ceci confirme donc que les novices n'adoptent pas un comportement efficace (Quimby & Watts, 1981 ; Sexton, 2000 in Wallis & Hornswill, 2007).

Par ailleurs, pendant la conduite, et malgré leurs niveaux physiologiques élevés, la perception de ces niveaux (estimations subjectives) par les novices ne diffère pas de celle des conducteurs en fin de permis probatoire, montrant qu'ils sous-estiment leur état interne et l'effort fourni pour réaliser la tâche. L'expérience de conduite semble donc avoir permis aux conducteurs plus expérimentés d'acquérir une meilleure conscience de la situation et de leur état interne.

Avant de débiter la tâche de conduite, les novices témoignent d'un niveau d'activation interne caractérisé par une forte dépense énergétique qui entraîne une charge de travail subjective élevée, comme le modèle de Thayer (1986) le prédit. Ce niveau d'activation élevé durant la conduite augmente le différentiel de fréquence cardiaque caractérisant la charge de travail.

Lorsque la vigilance subjective des novices augmente avant et après la conduite, le différentiel de fréquence cardiaque diminue ce qui indique que lorsqu'ils s'estiment vigilants, l'effort physiologique fourni pour effectuer la tâche de conduite est plus faible (Galy, et al., 2012). Par ailleurs, un niveau initial de vigilance et de tension élevé entraîne alors un niveau subjectif de charge de travail élevé. Celui-ci provoque une dégradation des performances (surcharge) et le nombre de collisions augmente, soit directement soit par l'intermédiaire d'un allongement des temps de réaction. À l'inverse, bien qu'un niveau élevé de tension entraîne également une hausse de charge, il raccourcit les temps de réaction et baisse le nombre de collisions avec les piétons.

Ces résultats sont par ailleurs modulés par la complexité de la situation. En effet, si les niveaux de charge subjective des novices ne varient pas en fonction des situations, probablement car la tâche de conduite leur apparaît difficile dans tous les cas, ceux des conducteurs expérimentés sont plus élevés dans les situations complexes que dans les moyennement complexes. Partant du constat qu'une charge de travail élevée dégrade les performances de conduite et que cette charge est plus élevée dans les situations complexes, on constate que, à la différence des novices, le niveau de vigilance, de tension et de charge de travail des conducteurs FinPB sont proportionnels à la difficulté de la situation, plus élevés dans les situations les plus complexes. Une surcharge de travail apparaît cependant dans ces situations, avec une hausse de charge de travail subjective entraînant une dégradation des performances (temps de réaction face à l'apparition des piétons les plus longs en situation très complexe). Ainsi, un niveau élevé de vigilance diminue la charge de travail des conducteurs possédant le permis depuis 3 ans mais lorsque cette dernière est élevée les temps de réaction s'allongent, ce qui témoigne d'une surcharge. Ceci pourrait être dû à une automatisation de la

tâche de conduite les rendant moins flexibles pour éviter rapidement les piétons (Besnard & Cacitti, 2001).

Dans les situations simples, une charge de travail élevée des novices entraîne une augmentation de la stabilité de vitesse (diminution des SD), ce qui indique que le fait d'être conscients de leur niveau de charge leur permet de mieux réguler leur vitesse, et une tension élevée améliore leurs performances sur les paramètres de contrôle de trajectoire (réduction des SDLP) et de vitesse (réduction des SD). Toujours dans les situations simples, une augmentation de leur charge objective augmente la stabilité de leur trajectoire (baisse des SDLP). Enfin, leur estimation de vigilance n'est perçue réellement élevée que lorsque la situation est très complexe, ceci peut alors expliquer qu'en situation simple, leurs temps de réaction face à l'apparition des piétons, de même que ceux des conducteurs plus expérimentés, s'avèrent longs.

Le niveau de charge objective des conducteurs en fin de permis probatoire est, comme celle des conducteurs débutants, plus élevé en situation simple qu'en situation très complexe, et une tension objective élevée diminue leur charge de travail. Leur vigilance et leur vitesse tendent à être plus élevées dans les situations moyennement complexes que dans les situations complexes et lorsque leur vigilance initiale est élevée, la stabilité de leur trajectoire augmente (baisse des SDLP). Ainsi, lorsque leur niveau de vigilance est élevé, son effet modulateur sur la charge de travail se traduit sur les performances. Ce maintien des performances lorsque la vigilance est élevée peut s'expliquer par la mise en œuvre de stratégies de régulation de la conduite, mobilisant une charge de travail supplémentaire (charge de travail essentielle ; Galy, Cariou, & Mélan, 2012). Ces stratégies de régulation ne peuvent être réalisées que par des personnes ayant déjà une certaine expérience de la conduite et lorsque les ressources cognitives sont suffisantes, c'est-à-dire ici par les conducteurs à la fin du permis probatoire et lorsque le niveau de vigilance est élevé.

3. Seconde expérience : vigilance, alcool et jeunes conducteurs

3.1 Contexte théorique

3.1.1. Vigilance, conduite et jeunes conducteurs

Les liens entre la vigilance des conducteurs et la sécurité routière font depuis longtemps l'objet d'investigations qui offrent un faisceau convergent de connaissances incitant à attribuer à l'hypovigilance un rôle important dans les accidents routiers. L'étude de l'oscillation des rythmes circadiens (la chronobiologie) montre qu'en 24 heures, la somnolence chez une personne éveillée survient le plus souvent entre 1 heure et 3 heures du matin, ainsi qu'entre 14 et 16 heures. Les performances se détériorent à ces moments précis de baisse de vigilance, qu'ils soient accompagnés d'épisodes d'endormissement ou non (Duta, Alford, Wilson, & Tarassenko, 2004). Les accidents qui se produisent à ces moments représenteraient 36,1 % des accidents mortels et 41,6 % de l'ensemble des accidents de la route (Philip, Vervialle, Le Breton, Taillard, & Horne, 2001).

La baisse de vigilance est également reliée aux exigences de la tâche. Ainsi, une tâche requérant un effort mental soutenu (e.g., autoroute monotone ou route urbaine) entraîne une baisse de vigilance au bout de quelque temps (Smit, Eling, & Coenen, 2004).

C'est ainsi que lorsque la situation de conduite est simple et monotone, l'attention soutenue est difficile à maintenir car l'activité devient quasi automatique ce qui est le cas des longues périodes de conduite sur autoroute (Campagne, Pebayle, & Muzet, 2004), et notamment avec un trafic fluide. Ce type d'environnement pauvre et répétitif induit alors une charge de travail élevée et prolongée entraînant une baisse de la vigilance qui obéit à la loi de dégradation dans le temps. En effet, une augmentation de la charge de travail entraîne une hausse de vigilance mais la tendance s'inverse lorsque les tâches deviennent plus difficiles et précises, voire sont de plus longue durée (Anseau & Timsit-Berthier, 1987). D'après le modèle de courbe en U renversé de Yerkes et Dodson, l'augmentation de la vigilance s'accompagne alors d'une amélioration des performances jusqu'à un optimum au-delà duquel les performances se détériorent (Figure 2).

Ainsi, lors de conduite sur autoroute, à partir d'une certaine durée de conduite, une augmentation de la sensation d'endormissement, une augmentation des temps de réaction représentant la détérioration de l'alerte et des performances, notamment en ce qui concerne la trajectoire, rendent la conduite insécurisée (Ting, Hwang, Doong, & Jeng, 2008).

D'un point de vue accidentologique, les problèmes de vigilance entraînent donc des pertes généralisées de capacités des conducteurs. Les accidents générés impliquent souvent un véhicule isolé roulant à grande vitesse et qui n'a pas tenté d'éviter l'accident (allongement du temps de réaction) (Hadj-Mabrouk et al., 2001). Ces accidents se manifestent quasi-systématiquement par une incapacité à réguler une trajectoire ou une inaptitude à assurer le guidage du véhicule dans sa voie de circulation (Van Elslande, Jaffard, Fouquet, & Fournier, 2009). En effet, le nombre de déviations latérales sur la chaussée augmente au fur et à mesure de la baisse de vigilance (Thiffault & Bergeron, 2003), la plupart des déviations semblent se produire vers la droite de la chaussée ce qui correspond à une sortie de voie (Campagne et al., 2004).

Les variations de vigilance affectent les performances de conduite différemment en fonction de l'expérience, notamment en termes de perception du danger. Ainsi, les conducteurs novices déclarent une forte hausse subjective de somnolence qui ralentit la perception du danger, contrairement aux expérimentés dont la faible hausse subjective de somnolence n'affecte pas les TR (Smith, Horswill, Chambers, & Wetton, 2009). Les novices auraient donc davantage de difficultés à exécuter la tâche de conduite lorsqu'ils sont en baisse de vigilance.

En résumé, des périodes de baisse de vigilance physiologiques « naturelles » sont identifiables chez une personne éveillée, notamment en milieu de nuit et en début d'après-midi. Lors de la conduite, elles se manifestent particulièrement lors de trajets monotones de longue durée. Le conducteur est alors soumis à une charge de travail élevée et doit fournir un effort supplémentaire s'il veut maintenir son niveau de compétence. Les accidents qui peuvent survenir pendant ces périodes sont assez caractéristiques, pertes de contrôle du véhicule sans action ou avec action tardive. Les conducteurs novices seraient particulièrement sensibles à ces baisses de vigilance.

3.1.2. Impact de l'alcool sur la conduite

Les études épidémiologiques indiquent que le risque d'accident pour un conducteur alcoolisé suit une courbe exponentielle, et ceci dès de faibles doses d'alcool : il double pour un conducteur alcoolisé à 0.2 gr/L comparativement à un conducteur sobre (Keall, Frith et Patterson, 2004), il est multiplié par cinq pour une alcoolisation comprise entre 0.5 et 0.79 g/L

et par 15 pour une alcoolisation supérieure ou égale à 0.8 g/L (Movig et al., 2004 ; Mura et al., 2003).

De plus, les jeunes conducteurs de moins de 21 ans sont plus susceptibles d'être impliqués dans un accident que ceux d'un âge supérieur, et ceci dès de faibles doses d'alcool (Peck et al., 2008). Ces résultats sont en accord avec ceux de Zador et al. (2000) qui indiquent que les jeunes conducteurs de moins de 20 ans constituent une catégorie particulièrement impliquée dans les accidents de la route, quel que soit le niveau d'alcoolémie, mais a fortiori lorsque le niveau est supérieur à la limite légale. Cette augmentation du risque d'accident après avoir consommé de l'alcool n'est significative que pour les accidents dits actifs c'est-à-dire les accidents dans lesquels le conducteur est en défaut (Horwood et Fergusson, 2000). Les accidents liés à l'alcool sont principalement dus à une perte du contrôle et n'impliquent qu'un seul véhicule, celui du conducteur (Morland et al., 2011). L'inexpérience de conduite à laquelle viennent s'ajouter les effets délétères de l'alcool semble ainsi entraîner une augmentation des risques d'accident.

Par ailleurs, les fonctions cognitives impliquées dans la conduite d'un véhicule sont dégradées par l'alcool et l'on trouvera dans le Tableau 3 un résumé des principales dégradations (Freydier, 2014). Ce tableau indique le taux de niveau d'alcool (en %) pour lequel 50 % des études indiquent une dégradation, le taux de niveau d'alcool le plus bas pour lequel les études indiquent une dégradation et le taux de niveau d'alcool le plus haut pour lequel les études ne montrent pas de dégradation.

L'ensemble des mécanismes cognitifs nécessaires à la conduite (vitesse de traitement de l'information, vision, attention sélective et divisée, mémoire, fonctionnement exécutif) est donc altéré par la consommation d'alcool. Toutefois, la majorité des recherches qui testent l'influence de l'alcool sur le temps de réaction simple échoue à démontrer un ralentissement significatif du traitement de l'information pour de faibles doses d'alcool (Moskowitz et al., 2000 ; Ogden et Moskowitz, 2004) et, lorsque le temps de réaction de choix est mesuré, une dégradation significative des performances n'est retrouvée qu'à partir d'un BAC de 0.6 gr/L (Fillmore, Ostling, Martin et Kelly, 2009).

Dès lors que la tâche évolue et se complexifie, l'alcool perturbe les compétences perceptives du conducteur en réduisant son aptitude à détecter le danger (Filtness, Rudin-Brown, Mulvihill et Lenné, 2013 ; West, Wilding, French, Kemp et Irving, 1993), notamment lorsque le danger se situe dans la périphérie du champ visuel du conducteur (Chapman et Underwood, 2002 ; Owsley et McGwin Jr, 2010). Ce phénomène, connu sous le nom d'effet tunnel, se retrouve dès l'ingestion d'une faible dose d'alcool (BAC de 0,3 gr/L) (Dupont et al., 2010). Enfin, l'influence de l'alcool sur les fonctions visuelles et la perception dépend de la complexité de l'environnement et de la tâche. Lorsque le nombre d'informations sensorielles à traiter augmente, ou encore lorsque que les informations sont présentées à un rythme soutenu ou proviennent de différentes sources simultanément, les effets délétères de l'alcool sur les fonctions visuelles et la perception sont particulièrement prononcés.

Par ailleurs, une faible dose d'alcool (BAC de 0.2 gr/L) semble être suffisante pour perturber les capacités d'attention sélective et d'attention divisée (Koelaga, 1995 ; Freydier, Berthelon, Bastien-Toniazzo, et Gineyt, 2014). L'alcool diminue les capacités mnésiques d'un individu, la mémoire visuo-spatiale est particulièrement sensible (Tiplady, Degia et Dixon, 2005). Les conducteurs alcoolisés qui réalisent une tâche d'attention divisée ne compensent pas la difficulté de la tâche par une réduction de leur vitesse mais sont toutefois conscients de l'impact négatif de l'alcool sur leurs performances puisqu'ils auto-évaluent leurs performances comme étant significativement détériorées (Harrisson et Fillmore, 2011). Ils

mettent aussi plus de temps pour réagir aux évènements c'est-à-dire pour adopter des stratégies comme un freinage ou une modification de trajectoire suite à la survenue d'un évènement soudain (Christoforou, Karlaftis et Yannis, 2010).

Tableau 3. Impact de l'alcool en fonction du niveau administré (Freydier, 2014).

BAC	Effets *
0.1gr/L	Flexibilité cognitive (Lyvers et Tobias-Webb, 2010)
0.2gr/L	Traitement de l'information spatiale Vigilance, poursuite visuelle, attention divisée (Moskowitz et Robinson, 1987, Moskowitz et Fiorentino, 2000, Koelaga, 1995 ; Rosselo <i>et al</i> , 1999) Erreur de tracking (poursuite, localisation) (Moskowitz et Burns, 1990) Shift attentionnel (Rosselo <i>et al</i> , 1999)
0.3gr/L	Comportements contrôlés (Holloway, 1994 ; Koelaga, 1995)
0.4gr/L	Contrôle inhibiteur, traitement de l'information (Fillmore <i>et al</i> , 2009, Abroms <i>et al</i> , 2006) Cécité attentionnelle aux changements (Clifasefi <i>et al</i> , 2006)
0.5gr/L	Comportements automatiques (Fisk et Schneider, 1982 ; Holloway, 1994, Koelaga, 1995)
0.6gr/L	Fonction frontale exécutive (Aires Domingues <i>et al</i> , 2009) Acuité visuelle (Moskowitz et Robinson, 1988)
0.8gr/L	Attention visuo-spatiale, difficulté en périphérie (Do Canto Pereira <i>et al</i> , 2007) Jugement et prise de décisions (Koelaga, 1995) Vigilance (Moskowitz et Robinson, 1987) Temps de réaction (Tiplady <i>et al</i> , 2005 ; Hernandez, Vogel-Sprott, Ke-Aznar, 2007) Erreur visuo-spatiale et estimation de longueur (Tiplady <i>et al</i> , 2005) Dynamique du véhicule – Contrôle latéral (Berthelon et Gineyt, 2014)
1gr/L	Performances simples et complexes (TR de choix, temps de détection, performances de poursuite, double tâche) (Chiles et Jennings, 1969).

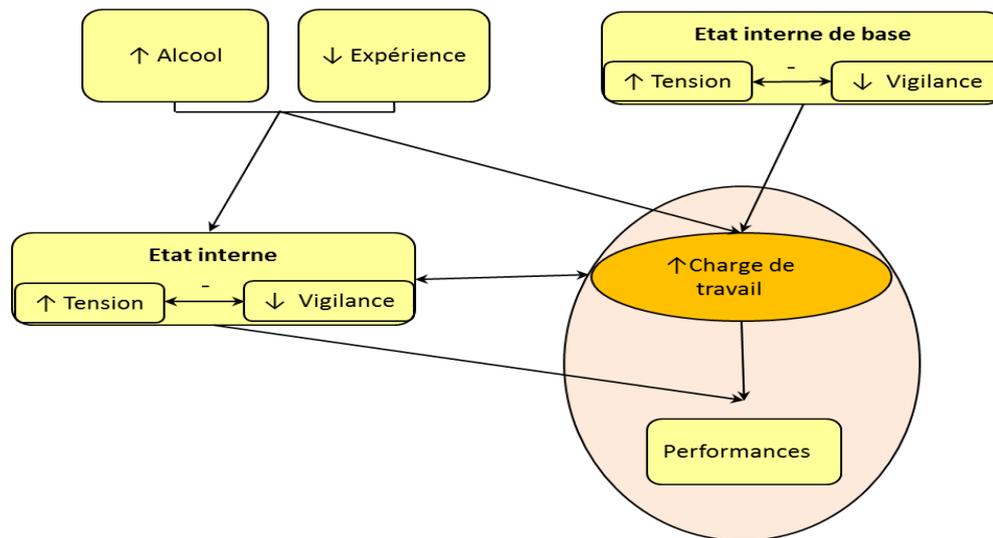
* : BAC minimum à partir duquel une dégradation significative est reportée.

Sous l'influence de l'alcool, les conducteurs présentent une augmentation de la variabilité des performances de contrôle latéral et longitudinal du véhicule (Berthelon et Gineyt, 2013 ; Verster et al., 2009).

3.1.3. Problématique

L'objectif principal de cette expérience est d'étudier conjointement les trois facteurs responsables de la majorité des accidents de la route que sont la baisse de vigilance, l'inexpérience de conduite et l'alcool. L'hypothèse est faite que la prise d'une faible dose

d'alcool en début d'après-midi, au moment de la baisse physiologique du niveau de vigilance (creux post prandial), pourrait entraîner un assoupissement précoce, notamment chez les jeunes conducteurs novices. La baisse de performance devrait s'amplifier au fur et à mesure de la conduite, notamment lorsque celle-ci est monotone et de longue durée. Le modèle ci-dessous (Figure 16) pourrait rendre compte des liens entre l'alcool et les facteurs accidentogènes manipulés.



Note : ↑ = hausse ; ↓ = baisse ; - = corrélation négative.

Figure 16. Liens entre différents facteurs accidentogènes : alcool, expérience, charge de travail, état interne et performance.

Les objectifs secondaires de cette expérience concernent l'étude des liens entre les variables d'effort et de vigilance estimées ainsi que l'étude des liens entre ces deux variables et les variables comportementales objectives, ceci en fonction de l'expérience et du niveau d'alcool ingéré. Enfin, le dernier objectif concerne les liens entre les variables physiologiques et les variables comportementales en fonction de l'expérience et du niveau d'alcool ainsi qu'en fonction du temps de conduite.

3.2. Partie expérimentale

3.2.1. Les participants

Seize conducteurs novices âgés de 18 ans avec moins de 2 mois de permis après un Apprentissage Traditionnel (AT ; 8 femmes et 8 hommes) ($M = 18$, $SD = 0$), et seize jeunes conducteurs âgés de 21 ans avec 3 ans de permis (arrivant donc à la fin du permis probatoire ; FinPB ; 8 femmes et 8 hommes) ($M = 21$, $SD = 0$) ont participé à 3 sessions expérimentales. Tous étaient en bonne santé et étaient examinés par un médecin avant d'être inclus dans l'expérience. Chaque participant signait un formulaire de consentement libre et éclairé et recevait une gratification de 130 € pour sa participation à l'expérience. Le protocole expérimental a été approuvé par le Comité d'Ethique et de Recherche (CERB) de l'IFSTTAR, ainsi que par le Comité de Protection des Personnes (CPP) Sud Méditerranée I.

L'expérience proprement dite était précédée d'une session d'entraînement à la conduite du simulateur et de ses commandes.

3.2.2. Protocole expérimental

Variables Indépendantes (VI) et variable contrôlée (VC) manipulées:

L'expérience répond au plan expérimental suivant : S16 < G2 > * A3

G2 : deux groupes de participants, 16 jeunes novices (AT) et 16 jeunes expérimentés (FinPB)

A3 : Alcool (3 modalités) ; Placebo, 0.2 g d'alcool par litre de sang, 0.5 d'alcool par litre de sang.

L'expérience se déroule systématiquement en début d'après-midi durant la période physiologique de chute de vigilance : creux postprandial (de 13h à 16h). Après ingestion de la boisson, les sujets conduisent le simulateur sur un circuit de type autoroutier (2 * 2 de voies avec un terre-plein central et glissières de sécurité) sans trafic et dans un environnement rural monotone. La tâche de conduite dure 45 minutes. La consigne donnée aux participants est de maintenir leur position en voie de droite et de garder une vitesse constante de 110 km/h.

Les variables dépendantes traitées ici sont, pour une grande part, identiques à celles traitées dans la première expérience (voir p. 13). Les données subjectives sont recueillies par l'échelle de vigilance subjective de Thayer (avant et après la session de conduite) et le questionnaire de charge mentale du NASA TLX (après la session de conduite).

Les données objectives de conduite sont la position latérale du véhicule sur la chaussée (moyenne et écart type) et la vitesse (moyenne et écart type). Ces données de conduite sont classiquement étudiées dans les études sur la vigilance et/ou la prise de drogues licites et illicites (Veldstra et al., 2012, Berthelon et Gineyt, 2014).

Les données physiologiques recueillies sont les mesures objectives de vigilance (rapport des ondes alpha + thêta / beta), de charge de travail (fréquence cardiaque) et de tension (réponse électrodermale) pendant la conduite. Les connaissances relatives à l'effet de l'alcool sur les variables physiologiques sont encore rares mais commencent à être étudiées dans le domaine de la conduite. Il apparaît ainsi que le rythme cardiaque augmente après 0.5 g/l (Brookhuis et De Waard, 1993 ; Ronen et al., 2008) voire 0.2 et 0.4 g/l d'alcool (Molnar et al., 2009). Pendant une longue durée de conduite monotone, l'alcool (0.25 et 0.35 g/l) augmente l'endormissement mesuré par EEG, notamment lorsqu'il est combiné à un manque de sommeil, et l'endormissement augmente avec la durée de la tâche (Vakulin et al., 2007). Enfin, les données concernant l'effet de l'alcool sur la conductance de la peau (EDA) ne permettraient pas d'avoir une idée unitaire de l'état émotionnel du conducteur (Sher, Bartholow, Peuser, Erickson et Wood, 2007).

Les valeurs d'alcoolémie désirées sont calculées avec les formules ci-dessous (Tiplady et al., 2005). Les résultats obtenus sont notés dans le Tableau 4.

$[3.82 - (0.143 \times A) + (0.168 \times H) + (0.525 \times W)] \times T/100$ pour les hommes

$[-3.67 + (0.187 \times H) + (0.432 \times W)] \times T/100$ pour les femmes.

Où A est l'âge (en années) ; H est la taille (cm) ; W est le poids (kg) ; et T est le niveau d'alcool désiré (mg/100 ml).

Tableau 4. Valeurs d'alcoolémie mesurées par volume d'air expiré, correspondance en g/l, avant et après la conduite en fonction du niveau d'expérience.

Valeur d'alcoolémie ciblées et obtenues	0.2 g/l Avant la conduite	0.2 g/l Après la conduite	0.5 g/l Avant la conduite	0.5 g/l Après la conduite
Jeunes conducteurs novices (AT)	0.114 (0.011) ≈ 0,2 g/l	0.064 (0.008) ≈ 0,1 g/l	0.252 (0.011) ≈ 0,5 g/l	0.166 (0.130) ≈ 0,23 g/l
Jeunes conducteurs expérimentés (FinPB)	0.108 (0.015) ≈ 0,2 g/l	0.044 (0.015) ≈ 0,1 g/l	0.254 (0.022) ≈ 0,5 g/l	0.162 (0.017) ≈ 0,23 g/l

Notons que suite à des problèmes d'enregistrements sur une partie des paramètres, seules les données de 15 sujets de 21 ans et de 15 sujets de 18 ans sont analysées.

3.2.3. Analyses statistiques

Avant de traiter l'ensemble des résultats, nous avons vérifié par une ANOVA effectuée sur les réponses des participants à l'échelle de Thayer remplie avant la conduite que les niveaux de vigilance subjective des deux groupes de conducteurs ne variaient pas significativement avant les sessions de conduite et quel que soit le niveau d'alcool.

Ensuite, toutes les données recueillies sont moyennées sur des intervalles temporels de 5 mn, les 5 premières minutes de conduite ne sont pas prises en compte dans les analyses.

Des analyses GLM (generalized linear model) sont alors effectuées afin de tester différents modèles des relations entre les variables. Les modèles linéaires généralisés permettent d'étudier le lien entre une variable dépendante et un ensemble de variables explicatives qui peuvent être catégorielles et continues. Ils englobent les modèles linéaires généraux (ANOVA, analyse de régression, ANCOVA), le modèle log-linéaire, la régression logistique et la régression de Poisson. L'indicateur associé à chaque variable explicative permettant de terminer le poids de cette variable dans le modèle explicatif est le Khi deux de Wald.

Dans le cas de relations significatives, les analyses GLM sont complétées par des tests de corrélation pour les variables continues (effort ressenti par exemple) ou des tests de comparaisons de moyenne pour les variables discrètes (taux d'alcool par exemple) afin de comprendre le sens de la relation.

La significativité statistique de l'ensemble des analyses était fixée à $p < .05$. Afin de clarifier la lecture des résultats, seules les analyses donnant lieu à des résultats significatifs seront présentées dans le texte. D'autre part, les valeurs des indices statistiques obtenues ne sont pas détaillées dans le texte mais sont disponibles en annexe 2.

3.2.4. Résultats

Etats internes et performances de conduite

L'effort estimé est corrélé positivement aux SDLP et aux SDvitesse, ainsi lorsqu'il est important, la trajectoire des conducteurs est moins stable et les SDvitesse augmentent.

De même, les SDLP et les SDvitesses augmentent avec une augmentation des valeurs d'EEG, c'est-à-dire avec une diminution de la vigilance objective. Un rapport élevé de la valeur d'EEG, (alpha + thêta) / beta, reflète en effet un faible niveau de vigilance objective. La vigilance estimée évolue de même (corrélation négative avec les SDLP et les SDvitesse), ainsi lorsque les conducteurs s'estiment peu vigilants, leurs SDLP et leurs SDvitesse augmentent. Leur trajectoire longitudinale et transversale est alors moins stable, l'on relève également une diminution de vitesse.

Les résultats indiquent un effet significatif du temps sur les EDA. Ainsi les valeurs d'EDA sont significativement supérieures pour la période 5-10 mn comparée à toutes les autres périodes sauf 10-15 mn, et pour la période 10-15 mn comparée à toutes les autres périodes sauf 15-20 mn et 40-45 mn (Figure 26). Ceci témoigne d'une diminution de tension objective au fur et à mesure du temps.

Le temps a un également un effet significatif sur l'ECG et les valeurs d'ECG sont significativement supérieures pour la période 5-10 mn comparée à toutes les autres périodes à partir de 20-25 mn (Figure 17). Il apparaît ainsi que la charge de travail mesurée par l'ECG, importante en début de conduite, diminue rapidement au fur et à mesure du temps mais n'interagit pas avec les autres variables testées.

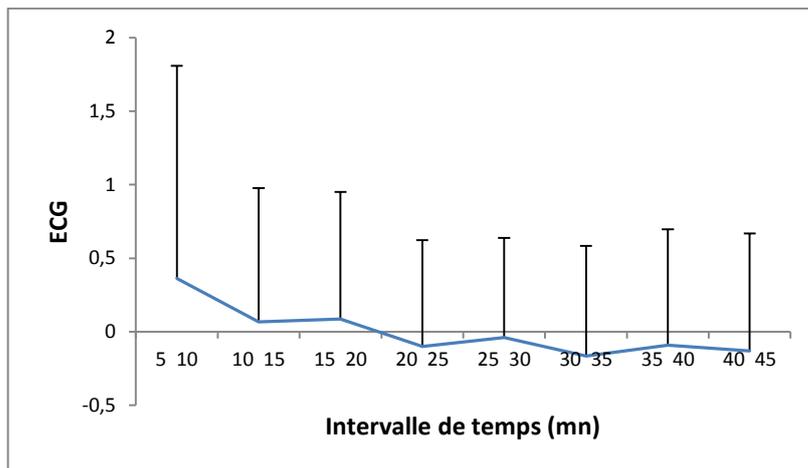


Figure 17. Mesures cardiaques moyennes en fonction de la durée de conduite.

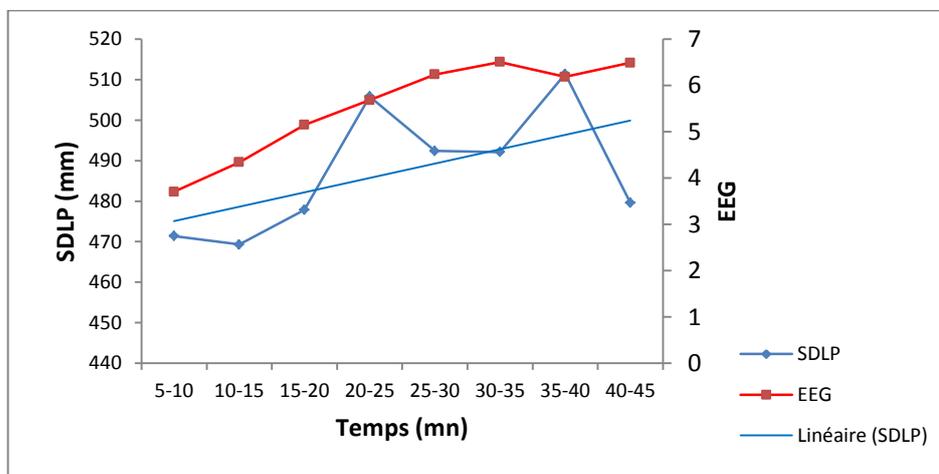


Figure 18. SDLP et EEG moyens en fonction du temps.

Par ailleurs, l'analyse des interactions montre clairement une baisse de vigilance objective significative au cours du temps associée à une augmentation des SDLP (Figure 18). Ceci témoigne d'une baisse de vigilance physiologique au fur et à mesure de la conduite, baisse qui s'accompagne d'une augmentation de l'instabilité de la trajectoire transversale et ce résultat est conforme à ceux de nos références bibliographiques.

Performances de conduite en fonction de l'expérience

En moyenne, les jeunes novices ($m = 7527$; $SD = 586$) circulent plus à droite de la chaussée que les jeunes expérimentés ($m = 534$; $SD = 244$) mais cette différence, bien que significative, est négligeable en termes de sécurité (7 mm). Elle pourrait être issue des consignes reçues lors de l'apprentissage qui sont de circuler très à droite de la chaussée, si cela était le cas, ces habitudes issues de l'apprentissage disparaîtraient donc avec l'expérience.

Les SDLP des AT ($m = 49.72$ cm, $SD = 20.31$) sont significativement plus importants que ceux des FinPB ($m = 47.65$ cm, $SD = 13.34$), ce qui indique plus de difficulté à avoir une trajectoire stable sur la chaussée et, en référence aux données de la littérature, semble directement lié à leur faible pratique de la conduite. En moyenne toutefois, ils ($m = 30.22$ m/s, $SD = 1.06$) circulent à une vitesse significativement inférieure à celle des jeunes conducteurs plus expérimentés ($m = 30.31$ m/s, $SD = 0.68$).

Etats internes et performances de conduite en fonction de l'expérience

Les jeunes novices estiment faire un effort plus important que les jeunes expérimentés pour accomplir la tâche de conduite, ce qui pourrait être lié au fait que leur manque de pratique nécessite globalement plus d'énergie pour effectuer la tâche (AT : $m = 12.42$, $SD = 4.38$; FinPB : $m = 12.16$, $SD = 3.93$). Ceci se vérifie d'ailleurs en particulier dans l'effort qu'ils estiment fournir dans la situation de conduite sans alcool (Figure 19).

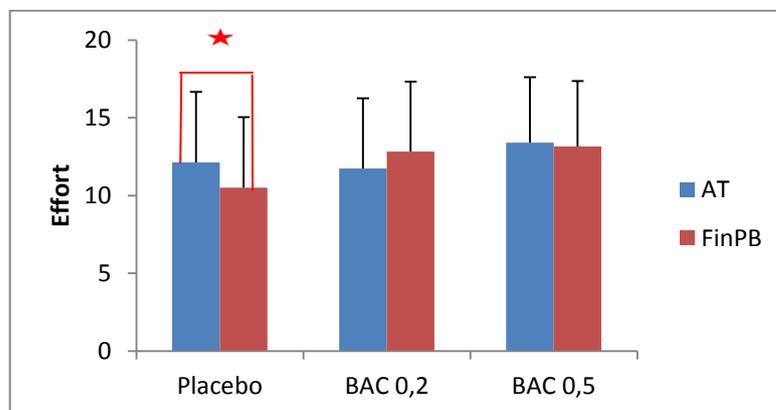


Figure 19. Effort estimé en fonction du niveau d'alcool et du niveau d'expérience en conduite.

Bien qu'il semble exister une corrélation positive entre l'effort et la position latérale des AT qui se positionneraient plus à gauche de la chaussée lors d'un effort important, cette corrélation n'apparaît pas significative. À l'inverse, les positions latérales des FinPB sont significativement corrélées à l'effort estimé. Ainsi, lorsque leur estimation d'effort est importante, ils sont positionnés plus à droite de la chaussée (Figure 20).

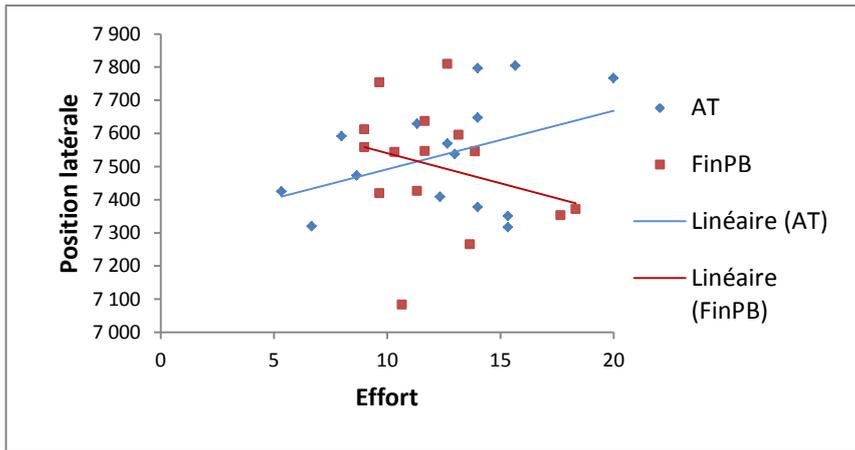


Figure 20. Position latérale sur la chaussée en fonction de l'effort estimé et du niveau d'expérience en conduite.

Par ailleurs, les jeunes novices ($m = 0,83$; $SD = 0,55$) s'estiment en moyenne moins vigilants que les jeunes conducteurs expérimentés ($m = 1,04$; $SD = 0,73$).

Il existe un effet significatif de la vigilance subjective sur l'effort estimé. En moyenne lorsque la vigilance estimée est faible, l'effort à fournir pour réaliser la tâche est estimé plus important que lorsque la vigilance estimée est élevée. D'autre part, même si l'effort des AT et celle des FinPB est liée à leur estimation de vigilance, il semble que l'effort fourni soit plus faible pour les AT que pour les FinPB lorsque la vigilance est élevée (Figure 21).

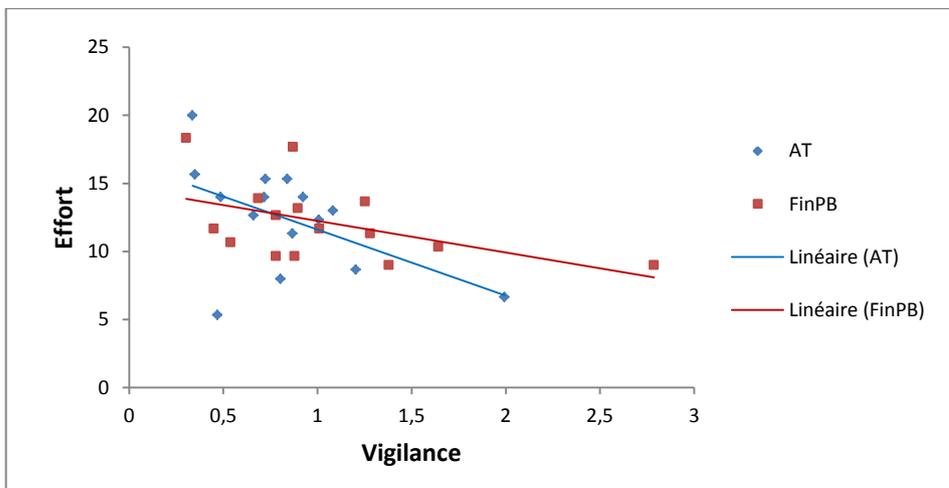


Figure 21. Effort estimé en fonction de la vigilance estimée et du niveau d'expérience en conduite.

Les interactions groupe et vigilance permettent de préciser que la vigilance estimée des FinPB n'est pas corrélée aux SDLP et donc que leurs SDLP sont équivalents quel que soit leur niveau de vigilance estimée. À l'inverse lorsque les AT estiment que leur vigilance est basse, leurs SDLP augmentent, et lorsqu'ils estiment leur vigilance élevée, leurs SDLP diminuent (Figure 22).

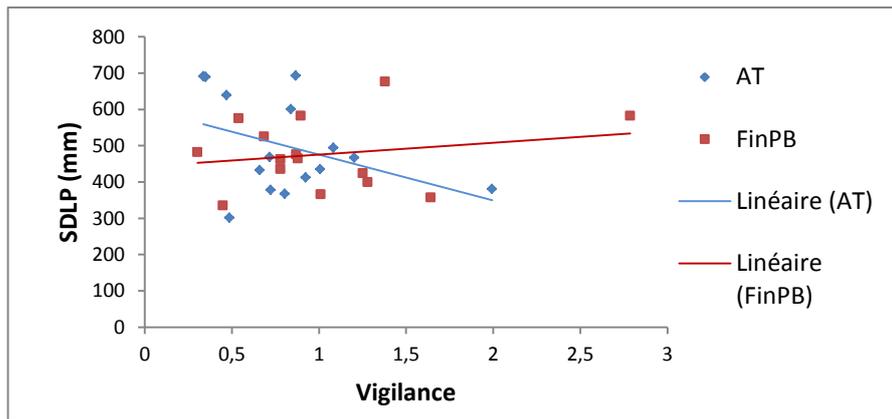


Figure 22. SDLP en fonction de la vigilance estimée et du niveau d'expérience en conduite.

La vigilance influe également sur la vitesse et les SDvitesse des AT. Lorsqu'ils estiment être très vigilants, leur vitesse est plus élevée et plus stable (SDvitesse plus bas) que lorsqu'ils estiment être peu vigilants (Figure 23).

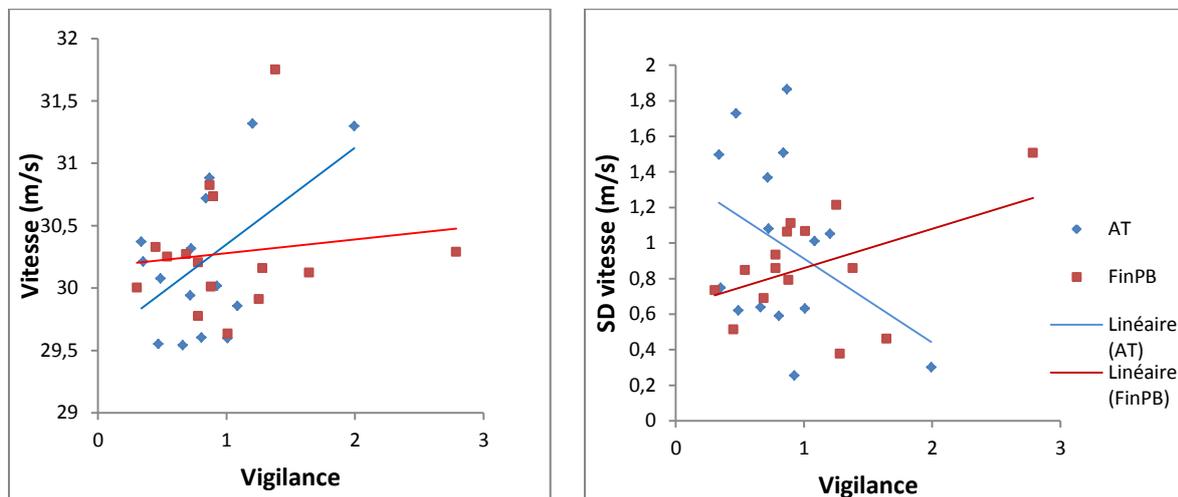


Figure 23. Vitesses (à gauche) et SDvitesse (à droite) moyennes en fonction de la vigilance estimée et du niveau d'expérience en conduite.

Comme nous l'avons déjà relevé, les jeunes novices s'estiment moins vigilants que les jeunes conducteurs expérimentés. Nous avons également observé que leurs mesures EEG ($m = 5.9$, $SD = 4.73$) témoignent effectivement d'un niveau d'éveil physiologique moyen plus faible que celui des FinPB ($m = 5.24$, $SD = 5.65$) cohérent avec l'effort supplémentaire qu'ils estiment faire lorsqu'ils effectuent l'activité de conduite.

Ils estiment également effectuer un effort similaire quel que soit leur niveau objectif de vigilance alors que les FinPB estiment leur effort plus important lorsque leur niveau de vigilance objective diminue, c'est-à-dire lorsque les valeurs ($\alpha + \theta$) / β d'EEG sont hautes (Figure 24).

Ces premiers résultats reflètent ainsi un parallèle entre vigilance subjective et vigilance objective en fonction du niveau d'expérience des conducteurs et une meilleure estimation de l'effort à fournir lorsque la vigilance physiologique des conducteurs est faible et qu'ils sont plus expérimentés.

Par ailleurs, la position latérale des FinPB n'est pas liée à leur niveau d'éveil physiologique (valeurs d'EEG) alors que les AT se positionnent plus au centre de la chaussée lorsque leur niveau d'éveil diminue (Figure 24). Il se pourrait donc que la position qu'ils adoptent corresponde à une mesure de précaution puisqu'ils sont plus éloignés du bord droit de la chaussée et ainsi moins susceptibles d'une sortie de route.

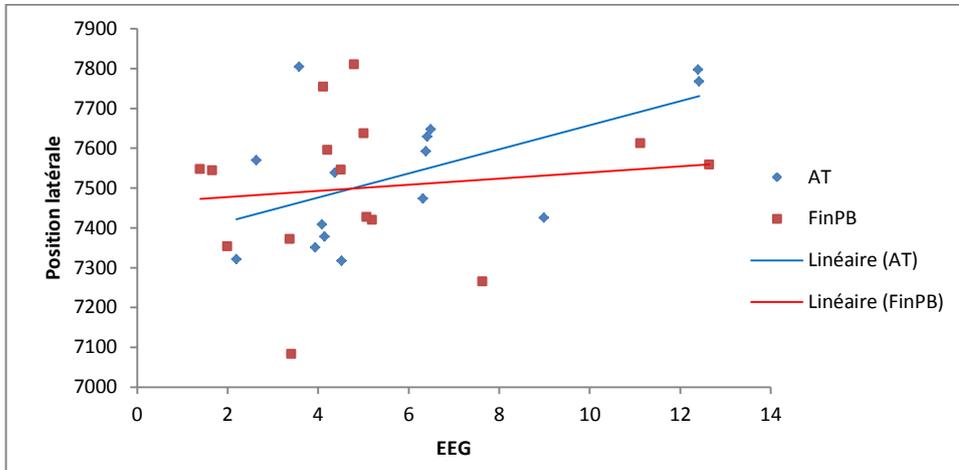


Figure 24. Position latérale sur la chaussée en fonction de l'EEG et du niveau d'expérience en conduite.

Enfin, la vigilance estimée par les FinPB est corrélée positivement avec leur niveau objectif de vigilance alors que celui des AT l'est négativement. Des analyses statistiques partielles selon que les individus (novices et expérimentés) estiment leur vigilance faible ou élevée indiquent que les différences observées entre les deux groupes (AT et FinPB) ne sont significatives que lorsque le niveau de vigilance des conducteurs est faible. Les données EEG ne présentent aucune différence significative entre les deux groupes pour les conducteurs ayant un niveau de vigilance élevé. Cela indique que les jeunes conducteurs les plus expérimentés ont tendance à sous-estimer leur état physiologique. Malgré des indicateurs EEG correspondant à une vigilance objective plus élevée que les conducteurs novices, ils reportent ainsi un sentiment de vigilance plus faible (Figure 25).

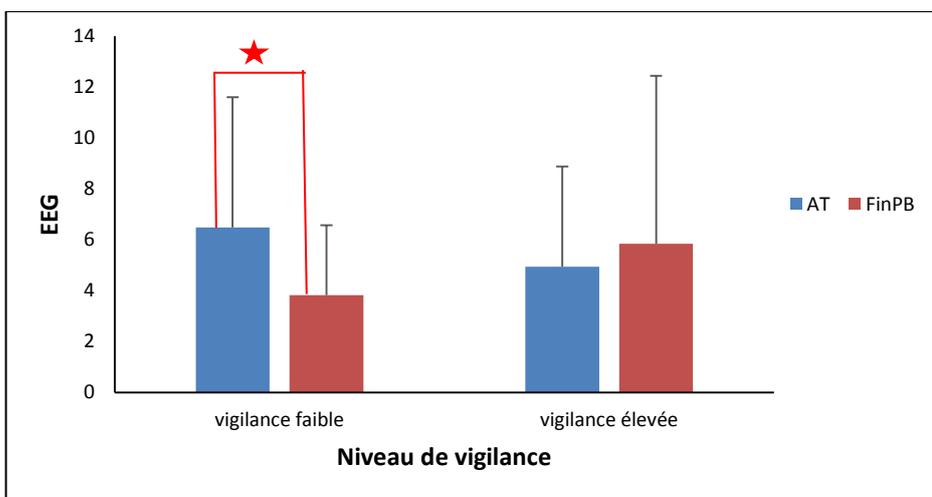


Figure 25. Mesures d'EEG moyennes en fonction de l'expérience de conduite et du niveau de vigilance.

États internes et performances en fonction de l'alcool

L'interaction alcool et temps indique qu'il existe un effet significatif du temps sur la tension pour 0.2 g/l et pour 0.5 g/l et non pas pour la condition sans alcool. Ainsi, pour 0.2 g/l, l'EDA est significativement supérieure pour la période 5-10 mn comparée à toutes les autres périodes et pour la période 10-15 mn comparée à toutes les périodes postérieures. Pour 0.5 g/l, l'EDA est significativement supérieure pour la période 5-10 mn comparée à 15-20 mn, 20-25 mn et 25-30 mn. Aucune variation significative n'est observée pour placebo (Figure 26). La tension objective, qui reflète l'anxiété des participants, est ainsi importante en début de parcours dans les conditions avec alcool et indique la réaction physiologique objective de l'organisme à l'absorption d'alcool. La tension objective n'a toutefois pas d'incidence significative sur les variables comportementales. Il est à noter que la tension diminue sur la totalité du parcours lorsque la dose d'alcool est limitée à 0.2 g/l alors qu'elle ne varie plus significativement à partir de 20-30 mn de conduite avec le taux de 0.5 g/l.

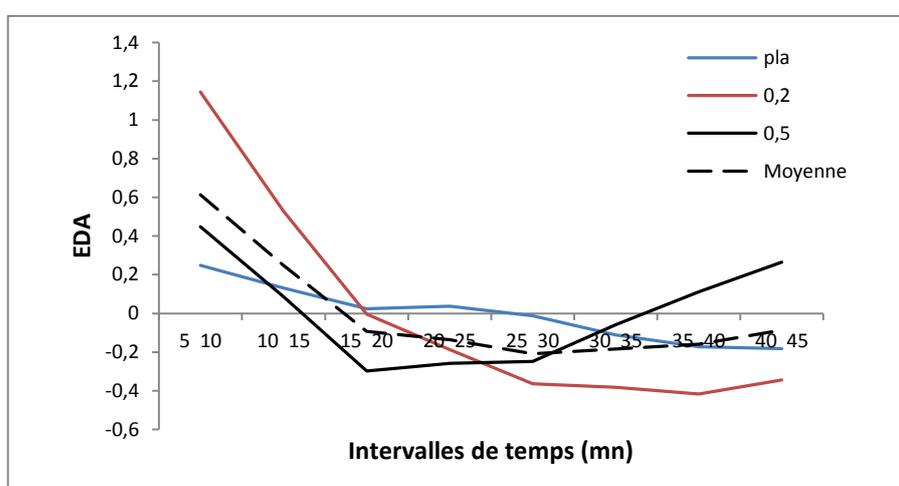


Figure 26. Mesures électrodermales en fonction de la durée de conduite (intervalles de temps) et du niveau d'alcool.

En présence d'alcool, tous les conducteurs s'estiment moins vigilants que sans alcool (placebo : $m = 1,07$; $SD = 0,70$; 0.2 g/l : $m = 0,88$; $SD = 0,54$ et 0.5 g/l : $m = 0,86$; $SD = 0,71$). Ce résultat va donc bien dans le sens d'un effet global de l'alcool sur la sensation d'éveil lorsque l'alcool est ingéré en début d'après-midi, au moment d'une baisse de vigilance physiologique liée aux rythmes circadiens. Toutefois, la vigilance estimée par les sujets n'est significativement corrélée avec le niveau d'éveil objectif (valeurs d'EEG) que pour le taux d'alcool le plus élevé. Ainsi, avec 0.5 g/l d'alcool dans le sang, plus le conducteur s'estime éveillé et moins il l'est réellement (valeurs d'EEG élevées indiquant une baisse de vigilance objective).

L'interaction entre l'EEG et le niveau d'alcool sur l'effort estimé révèle que c'est uniquement avec un placebo qu'une diminution de l'effort estimé est associée à une baisse de vigilance objective (augmentation de la variable EEG ; voir Figure 27). En présence d'alcool, même à très faible dose, l'effort est estimé constant quel que soit le niveau de vigilance objective.

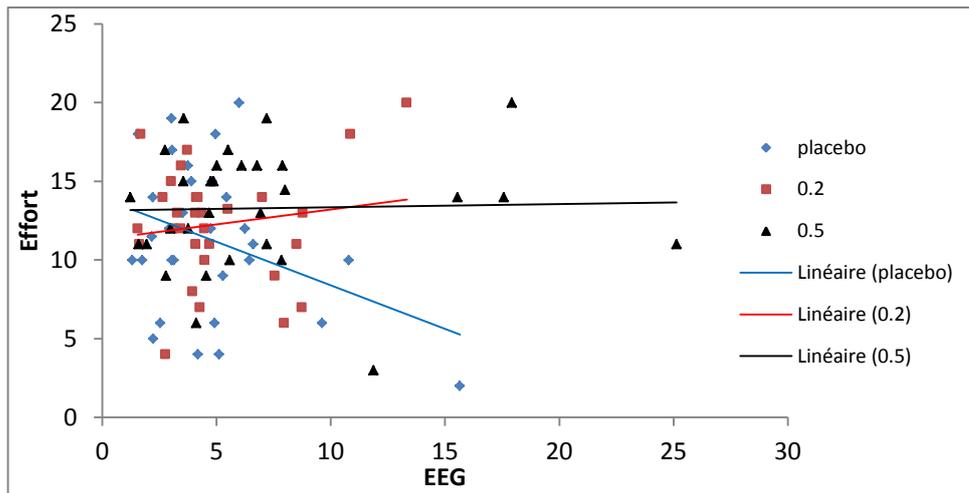


Figure 27. Effort estimé en fonction du niveau d'éveil et du niveau d'alcool

Il existe une corrélation positive entre l'effort et le taux d'alcool sur les SDLP qui augmentent avec 0.5 g d'alcool uniquement. Ceci indique qu'avec l'augmentation d'alcool dans le sang, l'augmentation d'effort est liée à une augmentation de l'instabilité de la trajectoire et que l'effort supplémentaire fourni par les conducteurs n'est donc pas suffisant pour empêcher la dégradation de leur trajectoire transversale avec un taux de 0.5 g/l.

L'alcool a également un effet significatif sur la vitesse moyenne qui est plus élevée avec 0.5 g/l ($m = 30.4$ m/s, $sd = 1.06$) qu'avec placebo ($m = 30.17$ m/s, $sd = 0.81$) et qu'avec 0.2 g/l ($m = 30.18$ m/s, $SD = 0.74$). Il apparaît donc que, à partir d'un certain niveau, l'alcool a un effet désinhibiteur qui lors de la conduite d'un véhicule se manifeste par une augmentation de la vitesse, augmentation dont les travaux épidémiologiques nous indiquent qu'elle augmente le risque d'accident.

L'interaction alcool et effort témoigne d'un effet significatif de l'effort sur la vitesse seulement pour la condition placebo et pour la condition 0.5 g/l. Ainsi, avec placebo, on observe une diminution de la vitesse lorsque l'effort augmente alors qu'avec 0.5 g/l la vitesse augmente avec l'effort (Figure 28). Il semble ainsi que sous placebo, lorsque l'effort à fournir pour réaliser la tâche est estimé important, les conducteurs réduisent leur vitesse ce qui pourrait correspondre à un comportement sécuritaire d'adaptation de la vitesse à la difficulté ressentie. À l'inverse, dès 0.5 g/l et malgré une sensation d'effort importante, les conducteurs ne régulent plus leur vitesse en ce sens et pourraient ainsi augmenter leur risque.

Les SDvitesse varient également avec l'effort pour placebo et 0.5 g/l. Ainsi, pour ces deux conditions, les SDvitesse augmentent quand l'effort augmente, alors que pour 0.2 g/l, les SDvitesse diminuent avec l'augmentation de l'effort (Figure 28).

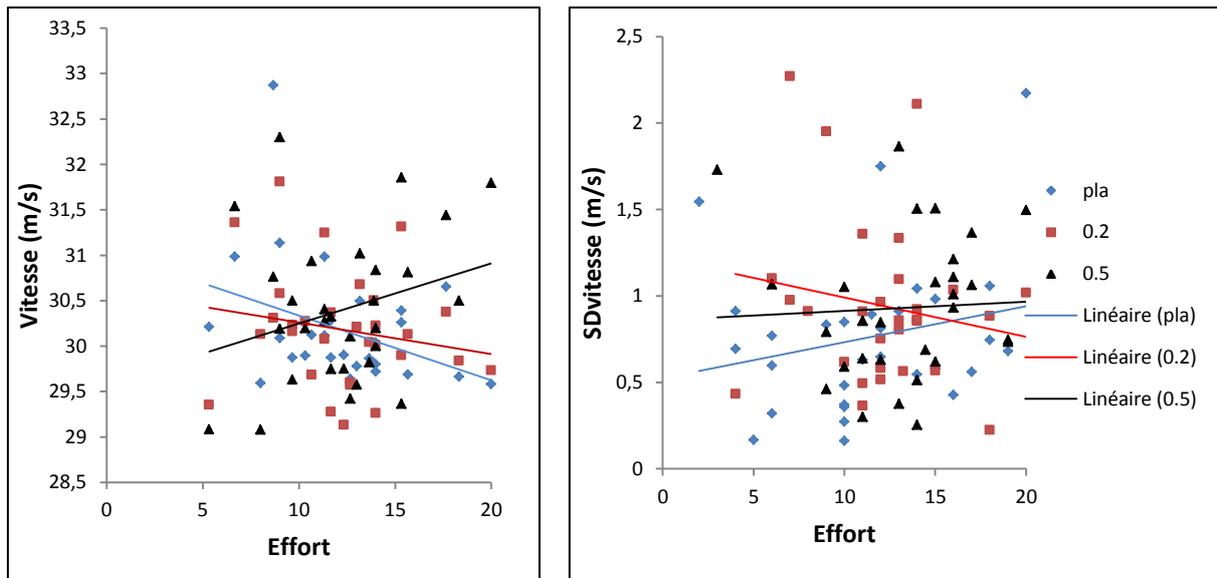


Figure 28. Vitesse (à gauche) et SDvitesse (à droite) en fonction de l'effort estimé et du niveau d'alcool.

Il existe également une interaction alcool et vigilance estimée sur la vitesse. Ainsi, les résultats montrent un effet significatif de la vigilance pour les conditions placebo et 0.2 g/l pour lesquelles une augmentation de la vigilance provoque une augmentation de vitesse. À l'inverse, quel que soit le niveau de vigilance, la vitesse reste constante avec 0.5 g/l (Figure 29).

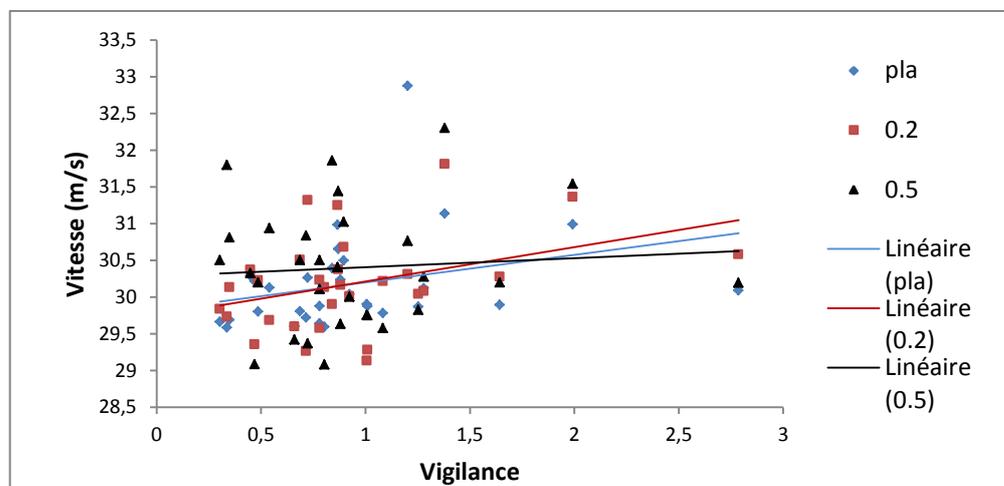


Figure 29. Vitesse moyenne pratiquée en fonction du niveau de vigilance estimée et du niveau d'alcool.

Il est important de noter que la baisse de vigilance objective (EEG) s'accompagne d'une réduction de vitesse avec placebo et 0.2 g/l alors qu'elle s'accompagne d'une augmentation de vitesse avec 0.5 g/l (Figure 30). Ceci souligne donc l'aspect prise de risque lors de la conduite sous influence d'alcool, même à dose relativement modérée. Les résultats témoignent également d'une augmentation des variations de vitesse avec le taux d'alcool qui se caractérise par le fait que SDvitesse sont plus élevées avec 0.5 g/l qu'avec 0.2 g/l et placebo. L'interaction alcool et EEG permet de préciser que cette augmentation des SDvitesse pourrait être plus importante avec 0.2 g/l et surtout avec 0.5 g/l (Figure 30).

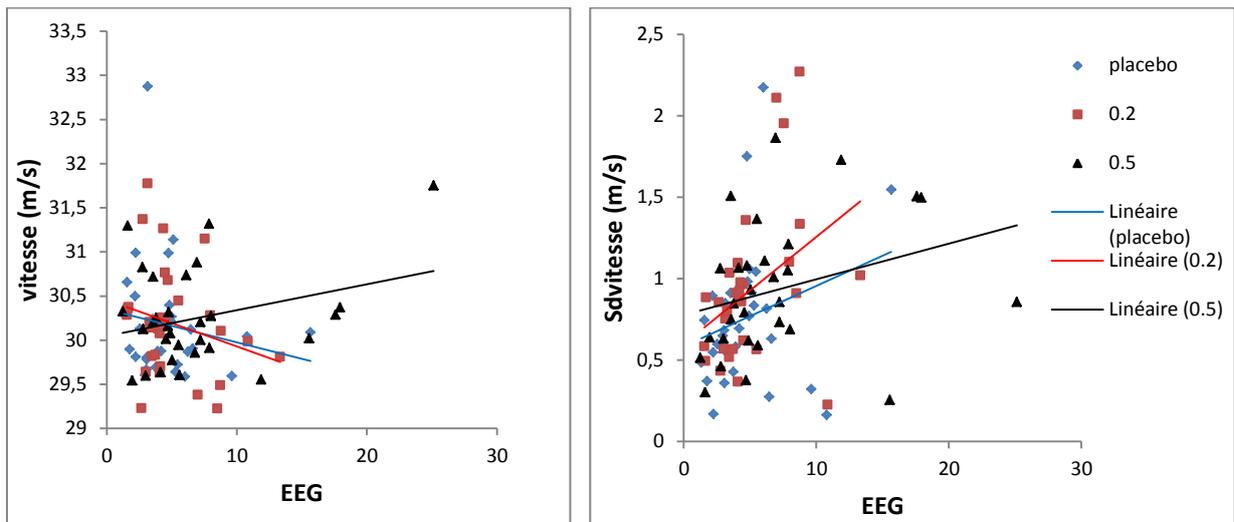


Figure 30. Vitesse (à gauche) et SDvitesse (à droite) en fonction de l'EEG et du niveau d'alcool.

Etats internes et performances en fonction de l'expérience et de l'alcool

Nous avons relevé précédemment que les FinPB circulent en moyenne plus vite que les AT, cependant une interaction groupe et alcool indique que ceci se vérifie notamment avec 0.5 g/l d'alcool alors que les AT ont une vitesse équivalente avec et sans alcool (Figure 31).

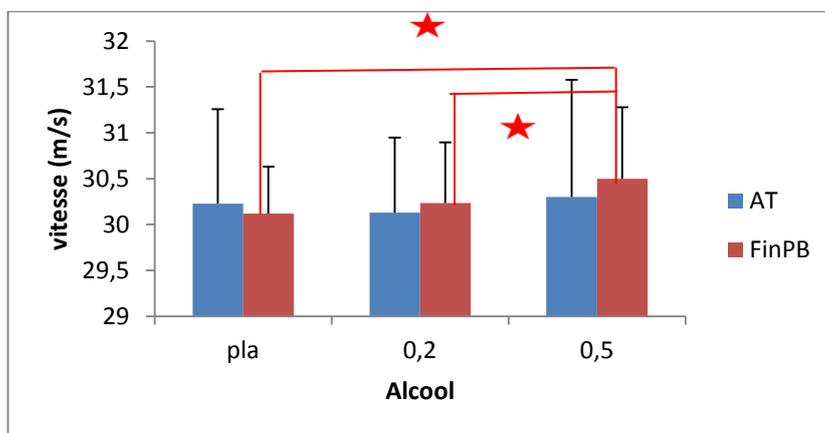


Figure 31. Vitesse moyenne pratiquée en fonction du niveau d'alcool et du niveau d'expérience en conduite.

Comme nous l'avons déjà souligné, les SDvitesse augmentent avec 0.5 g/l. Toutefois, l'interaction groupe et alcool permet de préciser ce résultat qui apparaît être spécifique des AT, ces derniers auraient ainsi plus de difficultés que les FinPB à stabiliser leur vitesse avec 0.5 g/l (voir Figure 32).

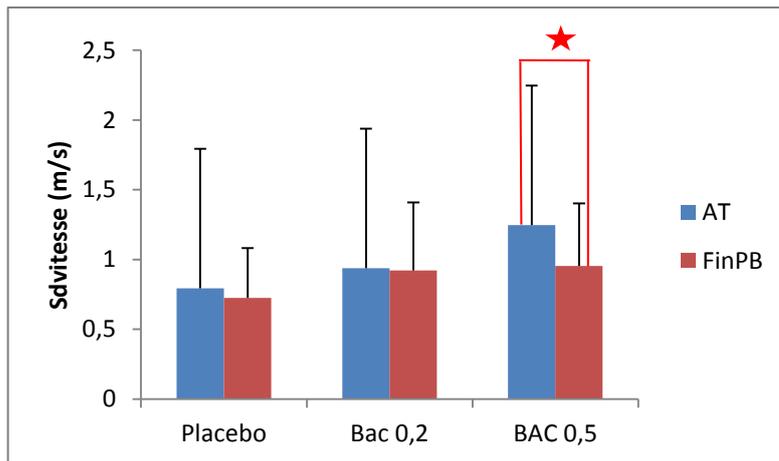


Figure 32. Déviations standard de vitesse (SDvitesse) en fonction du niveau d'alcool et du niveau d'expérience en conduite.

D'autre part, précédemment nous avons relevé que l'EEG indiquait un niveau d'éveil le plus bas avec 0,5 g/l. La diminution du niveau d'éveil est progressive pour les AT (différence significative uniquement entre la condition sans alcool et la condition 0,5 g/l) alors que cette diminution n'apparaît chez les FinPB qu'avec la condition 0,5 g/l (différences significatives entre la condition 0,5 g/l et les deux autres conditions sans alcool et 0,2 g/l) (Figure 33).

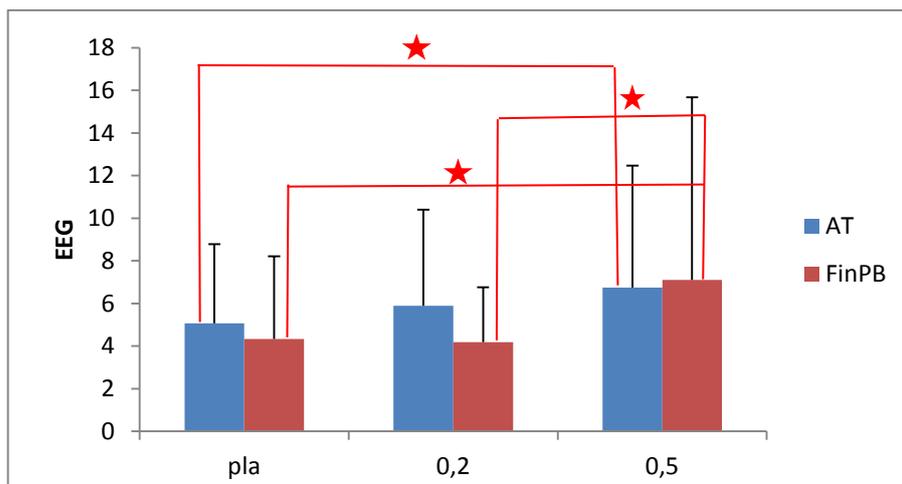


Figure 33. Mesures d'EEG moyennes en fonction du taux d'alcool et de l'expérience de conduite.

3.3. Discussion et conclusion de la seconde expérience

L'objectif principal de cette expérience était de vérifier que la prise d'une faible dose d'alcool en début d'après-midi, au moment de la baisse physiologique du niveau de vigilance, avant une conduite monotone et de longue durée, pouvait entraîner un assoupissement précoce et une baisse de performance à cause d'une augmentation de la charge de travail, notamment chez les jeunes conducteurs novices.

Il s'agissait également d'étudier la façon dont les conducteurs étaient capables d'estimer leur état interne ainsi que les répercussions de ces estimations sur les performances de conduite.

L'échelle de Thayer a permis d'estimer les niveaux subjectifs de vigilance et de tension. Le NASA-TLX a permis d'estimer le niveau subjectif de charge de travail. Les variables physiologiques ont permis d'enregistrer des indicateurs objectifs de charge de travail, d'anxiété et de niveau d'éveil des conducteurs.

Les analyses effectuées ont permis de constater l'adéquation du modèle proposé en début de ce rapport et de confirmer les effets de l'état interne du conducteur sur la charge de travail et les performances de conduite en fonction du niveau d'alcool ingéré d'une part et en fonction de l'expérience de conduite d'autre part (jeunes novices vs. jeunes conducteurs à la fin du permis probatoire).

Etat interne, répercussions sur la conduite

Lorsque la vigilance (subjective et objective) diminue, l'effort estimé par les participants pour accomplir la tâche de conduite augmente. En effet, dans le cas d'un niveau de vigilance faible, les individus ayant moins de ressources cognitives à leur disposition, la même tâche est alors ressentie comme étant plus coûteuse et demandant un effort plus important pour être réalisée (Fabri, Natale, & Adan, 2007). Une augmentation de l'effort entraîne à son tour une augmentation des SDLP soit une diminution de la stabilité de la trajectoire. À l'inverse, une augmentation de vigilance entraîne directement une diminution de la variabilité de la vitesse des participants, soit une meilleure stabilité de la vitesse de leur déplacement.

La tension objective de tous les participants (EDA), reflet de leur anxiété, est élevée en début de session de conduite mais baisse significativement ensuite pendant 15 à 20 mn, puis elle se stabilise et remonte légèrement pendant les 5 dernières minutes de conduite. L'ECG, réponse physiologique de l'organisme à la charge de travail, est également élevé en début de trajet, puis diminue et se stabilise définitivement à partir de 20-25 mn de conduite. Ce résultat pourrait être un signe général « d'assouplissement » des conducteurs au fur et à mesure du parcours routier (Koelega, 1995). Cependant, ces deux variables objectives de l'état interne du conducteur n'ont pas d'effet direct global sur les paramètres de conduite.

Etat interne en fonction du niveau d'alcool, répercussions sur la conduite

La vitesse pratiquée par les participants est moins élevée et moins variable (SDvitesse) dans la condition sans alcool (placebo) ou avec une faible dose d'alcool (0.2 g/l) qu'avec 0.5 g/l d'alcool. Ce résultat pourrait être lié à un effet désinhibiteur de l'alcool sur le comportement incitant à une prise de vitesse mais provoquant également une instabilité de cette dernière. Une dégradation significative du maintien du contrôle longitudinal de la vitesse semble ainsi se vérifier sous l'emprise de l'alcool (Veldtra et al., 2012 ; Berthelon et Gineyt, 2014).

La vigilance estimée par les participants tend globalement à être plus élevée sans alcool qu'avec alcool. Lorsqu'elle est élevée, elle est associée à une vitesse plus élevée dans la condition placebo et pour 0.2 g/l. À l'inverse, quel que soit son niveau, elle n'influe pas sur les vitesses pratiquées avec 0.5 g/l. Ce résultat démontre un effet de l'alcool sur les performances de conduite par la diminution du niveau de vigilance. Ainsi, il existerait un effet cumulatif de la vigilance et de l'alcool sur la vitesse de conduite révélant une dégradation plus importante à 0,5 g/l lorsque la vigilance est faible.

Quand l'effort estimé pour effectuer la tâche augmente, la stabilité de la vitesse augmente pour la condition placebo et 0.2 g/l. À l'inverse, une augmentation de l'effort

estimé pour effectuer la tâche provoque une diminution de la stabilité de vitesse pour 0.5 g/l, l'effort fourni n'est donc pas suffisant pour compenser l'effet de l'alcool. Il est également à noter qu'une augmentation d'effort entraîne une diminution de vitesse avec placebo alors qu'elle entraîne une augmentation de vitesse avec 0.5 g/l, ce qui va bien dans le sens d'un effet désinhibiteur de l'alcool sur les performances de conduite.

Enfin, l'on relève que la tension objective (EDA) est très élevée pendant les premières minutes de conduite pour les deux conditions avec alcool. Avec 0.2 g/l, elle baisse régulièrement jusqu'à 20 mn de parcours, la baisse est de même nature, bien que moins abrupte, avec 0.5 g/l. Ce résultat peut être expliqué par l'effet physiologique de l'alcool sur l'organisme. Dans un premier temps, l'alcool aurait un effet légèrement anxiogène expliquant les valeurs élevées d'EDA en début de conduite, puis dans un second temps l'alcool aurait tendance à diminuer l'activation nerveuse provoquant une diminution de la tension (anxiété) et un effet sédatif (Koelega, 1995).

Etats internes en fonction du niveau d'expérience, répercussions sur la conduite

De façon générale et indépendamment de leur état interne, on remarque que les jeunes conducteurs venant d'obtenir leur permis de conduire (AT) ont plus de difficultés que les autres à stabiliser leur trajectoire (SDLP élevés) et leur vitesse (SDvitesse élevée). Ce résultat est en accord avec l'ensemble de la littérature concernant le comportement des jeunes conducteurs novices dont les compétences sont régulièrement trouvées inférieures à celles de conducteurs plus expérimentés. Ici, nous avons pu noter que cette différence est déjà notable après 3 années de pratique de la conduite. Cette difficulté des jeunes conducteurs novices est encore amplifiée lorsqu'ils estiment être peu vigilants. Il est à noter que, lorsqu'ils estiment que leur vigilance est élevée, leur vitesse se stabilise.

Les jeunes novices estiment également faire un effort plus important que les jeunes expérimentés pour effectuer la tâche de conduite qu'ils estiment donc toujours difficile. L'effort pratiqué par les FinPB entraîne une modification de leur position latérale sur la chaussée correspondant à un positionnement plus à droite de la chaussée.

Etats internes en fonction de l'alcool et du niveau d'expérience, répercussions sur la conduite

L'effort ressenti par les jeunes novices (AT) aussi bien que par les jeunes expérimentés (FinPB) apparaît constant quelle que soit la condition alcool, cependant l'effort des FinPB est estimé plus faible que celui des AT dans la condition sans alcool contrairement aux conditions alcool. Ce résultat peut être expliqué par le fait que les AT estiment la situation difficile dans tous les cas, ou par le fait qu'ils sous-estiment leur état interne et ne sont pas conscients de l'effet de l'alcool sur leurs capacités. Les données tendent à penser que la deuxième hypothèse soit la plus plausible étant donné que l'effort ressenti par les AT n'est pas significativement supérieur à celui des FinPB dans les conditions avec alcool. Par ailleurs, cette hypothèse serait en accord avec les résultats obtenus dans l'étude précédente (étude 1 de ce rapport) et paraît être confirmée par le fait que la stabilité de la vitesse diminue pour les AT avec 0,5 g/l alors qu'elle reste stable pour les FinPB.

Ainsi, l'alcool semble avoir des effets à des doses plus faibles chez les jeunes conducteurs venant juste d'obtenir le permis de conduire que chez les jeunes conducteurs plus expérimentés et ce résultat confirme nos travaux antérieurs (Freydier et coll., 2014) qui mettaient en effet en évidence que, avec des groupes de sujets similaires à ceux de la présente expérience (AT et FinPB) et une situation de double tâche, les SDLP des jeunes novices augmentaient dès 0,5 g/l. Ce résultat est d'autre part cohérent avec le fait que l'alcool

provoque communément à faible dose un effet psychostimulant, puis avec l'augmentation de la dose un effet sédatif (Singh et Heberlein, 2000). L'effet psychostimulant est associé à une augmentation de la vitesse d'exécution accompagnée d'une augmentation du nombre d'erreurs (Girre et coll., 1991). Il semblerait donc que les FinPB soient capables de gérer cet effet psychostimulant, les SDvitesse restant stables, contrairement aux AT.

4. Discussion et conclusion générale

Les résultats de ce travail indiquent que les modèles présentés précédemment (p. 10 et p. 29) et testés lors des deux études sont vérifiés. Ainsi, les données obtenues rendent compte d'une interaction entre des facteurs situationnels et individuels pour expliquer les performances de conduite observées.

De manière générale, les performances se dégradent lorsque la situation de conduite se complexifie et sous l'emprise de l'alcool. Nos deux études ont permis d'identifier des facteurs permettant de compenser ou au contraire de renforcer cette dégradation des performances, et de comprendre leur interaction.

Ainsi, malgré des situations de conduite généralement considérées comme délétères pour les performances (Figure 1 ; Meister, 1976), les performances sont préservées lorsque les conducteurs sont expérimentés et lorsque leur niveau de vigilance est élevé. Dans les deux cas, les conducteurs peuvent alors mettre en œuvre des stratégies de régulation de leur conduite. En effet, une vigilance élevée permet d'avoir une quantité de ressources disponibles suffisante pour en allouer une partie à la mise de place de stratégies de régulation (Galy et al., 2012 ; Galy & Mélan, 2015). En ce sens, seuls les jeunes conducteurs expérimentés ont à leur disposition de telles stratégies, développées au cours de leur pratique, alors que les jeunes conducteurs novices n'ont pas encore à leur disposition les capacités nécessaires à de telles stratégies de régulation ce qui pourrait en partie expliquer leur plus grande implication dans les accidents routiers, notamment dans les mois suivant l'obtention du permis.

Par ailleurs, l'alcool dégrade les performances de conduite, et ceci d'autant plus que l'effort ressenti est élevé, que la vigilance est faible et que les conducteurs manquent d'expérience. Ainsi, l'effet de l'alcool semble être potentialisé par l'état physiologique et les caractéristiques cognitives des individus, tout en étant lié au niveau d'expérience en conduite. Tout comme pour la complexité de la situation, l'effet de l'alcool paraît ainsi être compensé, dans une certaine mesure, par la mise en œuvre de stratégies de régulation rendue possible par une quantité de ressources disponibles élevée (vigilance élevée) due à l'expérience acquise par la pratique de la conduite. Cette possibilité de compensation semble être liée à une meilleure conscience de la situation de la part des conducteurs expérimentés même sous l'emprise de l'alcool. Des études complémentaires devront être menées pour confirmer cette hypothèse. Par conséquent, les résultats obtenus sont en accord avec la législation démontrant que les conducteurs expérimentés maintiennent des performances de conduite acceptables jusqu'à 0,5 g/l alors que les conducteurs novices voient leurs performances se dégrader à des taux inférieurs. En complément à de telles mesures législatives, un effort pourrait être fait lors de la formation des conducteurs afin de les aider à prendre conscience de leur état interne avant la prise du volant, puisque le manque de conscience de la situation et de leur état interne a été mis en évidence aussi bien dans la première que dans la deuxième expérience.

Finalement, nos résultats soulignent que l'apprentissage de la conduite est complexe et ne se limite pas aux quelques heures de conduite en école avant l'obtention du permis mais se construit sur la durée et est en évolution constante. Il resterait alors à différencier les évolutions dues à la pratique de la conduite de celles dues à l'âge, en particulier en ce qui concerne la prise de conscience de son état interne.

Valorisation

Paxion, J., Berthelon, C., Galy, E., & Arciszewski, T. (2014). Subjective and objective workload: a different impact on performance due to situation complexity and driving practice? Proceeding of the 28th International Congress of Applied Psychology - ICAP 2014. Paris, France, 8-13 juillet 2014.

Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2014). Effects of situation complexity and driving experience on performance through subjective and objective tension. Proceeding of the 32nd Annual Conference of the European Association of Cognitive Ergonomics – 1-3 septembre 2014, Vienne, Autriche.

Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2014). Complexité de la situation et de l'expérience de conduite : quels impacts sur les mesures objectives et subjectives de charge de travail ? Séminaire du Centre PsyCLE. Communication affichée. Aix-en-Provence, France.

Berthelon, C., Paxion, J., & Galy, E. (2014). Alcool, vigilance, Charge de travail : facteurs d'accident chez les jeunes conducteurs (ALCOLAC). Rapport intermédiaire de contrat Fondation sécurité routière. Juin 2014.

Berthelon, C. (2014). Présentation du projet ALCOLAC à la rencontre entre chercheurs du 6 octobre 2014. Montreal, Quebec.

Ferrier, L., Berthelon, C., & Galy, E. (2015). Driving experience, alcohol and monotonous simulated driving: behavioral and subjective measures. Road Safety Simulation conference, October 6-8, 2015, Orlando, Florida USA.

Ferrier, L., Galy, E., & Berthelon, C. (2015). Monotonous simulated driving, driving experience, and low doses of alcohol: behavioral, subjective and psychophysiological measures. 18th Euro working Group in Transportation. 14-16 July 2015, Delf, the Netherlands.

Berthelon, C., Galy, E. (2016). Expérience de conduite, alcool et environnement monotone. Communication au Colloque international « Risques routiers et transports durables ». 18 et 19 mai 2016, Angers, France.

Berthelon, C., Galy, E. (2016). Alcohol and young drivers: subjective tension, alertness, and performance. Communication at the XXVIIIth Annual International Occupational Ergonomics and Safety Conference, June 9-10, 2016, Chicago, Illinois, USA.

Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (2016). Subjective and objective workload: different impacts on driving performance due to situation complexity and experience. Communication at the XXVIIIth Annual International Occupational Ergonomics and Safety Conference, June 9-10, 2016, Chicago, Illinois, USA.

Berthelon, C., Galy, E., Loeches de la Fuente, H. (2016). Are low doses of alcohol taken at 2pm objectively and subjectively more decrement for novices drivers than for more experienced drivers? Communication affichée at the 7th international conference on Applied Human Factors and Ergonomics, Florida USA, 27-31 July 2016.

Paxion, J., Galy, E., & Berthelon, C. (soumis). Complexité des situations, expérience, charge de travail, tension et vigilance : quels impacts sur les performances de conduite ? Article soumis à la revue « le travail humain ».

Galy, E., Paxion, J., & Berthelon, C. (soumis). The existence of several components of mental workload. What does the NASA-TLX really measure? The example of driving. Article soumis à la revue "Ergonomic".

Références

- Abroms, B.D., Gottlob, L.R. et Fillmore, M.T. (2006). Alcohol effects on inhibitory control of attention: distinguishing between intentional and automatic mechanisms. *Psychopharmacology*, 188, 324-334.
- Aires Domingues, S.C., Barreto Mendonca, J., Laranjeira, R., Nakamura-Palacios, E.M. (2009). Drinking and driving: a decrease in executive frontal functions in young drivers with high blood alcohol concentration. *Alcohol*, 43, (8) 657-664.
- Ansseau M., & Timsit-Berthier, M. (1987). Vigilance et troubles psychiatriques. *NeuroPsy.*, 2(2), 105-110.
- Arend, I., Colom, R., Botella, J., Contreras, M. J., Rubio, V. & Santacreu, J. (2003). Quantifying cognitive complexity : evidence from a reasoning task. *Personality and Individual Differences*, 35(3), 659-669.
- Ba, Y. & Zhang, W. (2011). A Review of Driver Mental Workload in Driver-Vehicle-Environment System. In *Internationalization, Design and Global Development* (pp. 125-134). Springer Berlin Heidelberg.
- Besnard, D., & Cacitti, L. (2001). Troubleshooting in mechanics: A heuristic matching process. *Cognition, Technology & Work*, 3(3), 150-160.
- Berthelon, C. et Gineyt, G. (2014). Effects of alcohol on automated and controlled driving performances. *Psychopharmacology*, 231 (10), 2087-2095.
- Brookhuis, K. A., De Vries, G., and De Waard, D. (1991). The effects of mobile telephoning on driving performance. *Accid. Anal. Prev.* 23, 309–316.
- Brookhuis, K., & Dewaard, D. (1993). The Use of Psychophysiology to Assess Driver Status. *Ergonomics*, 36(9), 1099-1110.
- Brookhuis, K.A., De Waard, D., Kraaij, J.H., & Bekiaris, E. (2003). How important is driver fatigue and what can we do about it? In D. De Waard, K.A. Brookhuis, S.M. Sommer, & W.B. Verwey (Eds.), *Human Factors in the Age of Virtual Reality* (pp. 191–207). Maastricht: Shaker Publishing.
- Campagne, A., Pebayle, T., & Muzet, A. (2004). Correlation between driving errors and vigilance level: influence of the driver's age. *Physiology & Behavior*, 80(4), 515-524.
- Cavallo, V., Brun-Dei, M., Laya, O. & Neboit, M. (1988). Perception and anticipation in negotiating curves: the role of driving experience. In *Vision in vehicles, II. Second International Conference on Vision in Vehicles* (pp. 365-374).
- Chapman, P.R., Underwood, G. et Roberts, K. (2002). Visual search patterns in trained and untrained novice drivers. *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, 5 (2), 157–167.
- Chiles, W.D, Jennings, A.E. (1969). Effects of alcohol on complex performance. *Human Factors*, 12 (6), 605-612.
- Chiron, M., Bernard, M., Lafont, S., & Lagarde, E. (2008). Tiring job and work related injury road crashes in the GAZEL cohort. *Accident Analysis and Prevention*, 40, 1096-1104.
- Christoforou, Z., Karlaftis, M. G., & Yannis, G. (2011). Young drivers and alcohol impaired driving: a driving simulator experiment. In *Proceedings of the Road Safety and Simulation Conference* (pp. 14-16).
- Clifasefi, S.L., Takarangi, M.K.T. et Bergman, J.S. (2006). Blind drunk : the effects of alcohol on inattentive blindness. *Applied cognitive psychology*, 20 (5), 697-704.
- Cnossen, F., Rothengatter, T., and Meijman, T. (2000). Strategic changes in task performance in simulated car driving as an adaptive response to task demands. *Transp. Res. Part F* 3, 123–140.
- De Craen, S., Twisk, D. A. M., Hagenzieker, M. P., Elfvers, H., and Brookhuis, K. A. (2008). The development of a method to measure speed adaptation to traffic complexity: Identifying novice, unsafe, and overconfident drivers. *Accid. Anal. Prev.* 40, 1524–1530.

- De Waard, D. (1996). The Measurement of Drivers' Mental Workload. Ph.D. thesis, Traffic Research Center, Groningen University, Groningen.
- De Waard, D., Van der Hulst, M., & Brookhuis, K. A. (1999). Elderly and young driver's reaction to an in-car enforcement and tutoring system. *Applied ergonomics*, 30(2), 147-157.
- Di Stasi, L. L., Renner, R., Staehr, P., Helmert, J. R., Velichkovsky, B. M., Cañas, J. J., Catena, A., & Pannasch, S. (2010). Saccadic peak velocity sensitivity to variations in mental workload. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 81(4), 413-417.
- Do Canto Pereira, L.H., de PA David, I., Machado-Pinheiro, W. et Ranvaud, R.D. (2007). Effects of acute alcohol intoxication on visuospatial attention. *Human & Experimental Psychology*, 26 (4), 311-319.
- Dupont, E., Martensen, H. et Silverans, P. (2010). Abaissement du taux d'alcool autorisé pour les conducteurs novices et les conducteurs de grands véhicules : 0.2 ‰. Institut Belge pour la Sécurité Routière -Centre de connaissance, Brussels, Belgium.
- Dula, C. S., Adams, C. L., Miesner, M. T., & Leonard, R. L. (2010). Examining relationships between anxiety and dangerous driving. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), 2050–2056.
- Duta, M., Alford, C., Wilson, S., & Tarassenko, L. (2004). Neural network analysis of the mastoid EEG for the assessment of vigilance. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 17(2), 171–195.
- Fabbri, M., Natale, V., & Adan, A. (2007). Effect of time of day on arithmetic fact retrieval in a number-matching task. *Acta Psychologica*, 127 (2), 285-290.
- Fairclough, S. H., Tattersall, A. J., & Houston K. (2006). Anxiety and performance in the British driving test. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 9(1), 43-52.
- Falzon, P., & Sauvagnac, C. (2004). Charge de travail et stress. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 175-190). Paris: Presses Universitaires de France.
- Fillmore, M.T., Ostling, E.W., Martin, C.A. et Kelly, T.H. (2009). Acute effects of alcohol on inhibitory control and information processing in high and low sensation-seekers. *Drug and Alcohol Dependence*, 100 (1-2), 91-99.
- Fitness, A.J., Rudin-Brown, C.M., Mulvihill, C.M. et Lenné, M.G. (2013). Impairment of simulated motorcycle riding performance under low dose alcohol. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 608-615.
- Fisk, A.D. et Schneider, W. (1982). Type of Task Practice and Time-Sharing Activities Predict Performance Deficits Due to Alcohol Ingestion. Dans *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*. Vol. 26 (p. 926-930).
- Freydier, C. (2014). Attention divisée en simulation de conduite automobile Influence de l'expérience et impact de l'alcool. Thèse de doctorat de l'Université d'aix Marseille. Soutenue le 7 juillet 2014.
- Freydier, C., Berthelon, C., Bastien-Toniazzo, M., Gineyt, G. (2014). Divided attention in young drivers under the influence of alcohol. *Journal of Safety Research*, 49, 1-18.
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis and Prevention*, 37(3), 461-472.
- Galy, E. (2013). Temps de travail pour tant de travail. Document de synthèse d'Habilitation à Diriger des Recherches. Aix-Marseille Université: Aix-en-Provence.
- Galy, E., Cariou, M., & Mélan, C. (2012). What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types? *International Journal of Psychophysiology*, 83(3), 269-275.
- Galy, E. & Gaudin, C. (2014). Vigilance et tension : effet de l'organisation du travail et de la perception de la situation de travail. *Le Travail Humain*, 77(4), 301-323.
- Galy, E. & Mélan, C. (2015). Effects of cognitive appraisal and mental workload factors on performance to an arithmetic task. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*.
- Girre, C., Hirschhorn, M., Bertaux, L., Palombo, S., & Fournier, P.E.. (1991). Comparison of performance of healthy volunteers given prazepam alone or combined with ethanol relation to drug plasma concentrations. *Int Clin Psychopharmacol*, 6, 227-238
- Hadj-Mabrouk, A., Hadj-Mabrouk, H., & Dogui, M. (2001). Chronobiologie de la vigilance Approche d'application dans le domaine de la sécurité routière. *Recherche-Transports-Sécurité*, 73, 3-26.

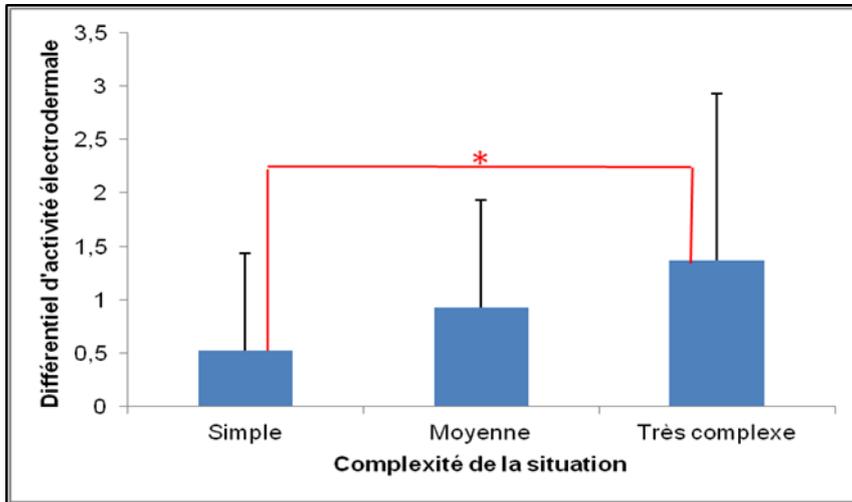
- Harrison, E.L.R. et Fillmore, M.T. (2011). Alcohol and distraction interact to impair driving performance. *Drug and Alcohol Dependence*, 117 (1), 31-37.
- Hernandez, O.H., Vogel-Sprott, M. et Ke-Aznar, V.I. (2007). Alcohol impairs the cognitive component of reaction time to an omitted stimulus: a replication and an extension. *Journal of Studies on Alcohol and Drugs*, 68 (2), 276-281.
- Hill, J. D., & Boyle, L. N. (2007). Driver stress as influenced by maneuvers and roadway conditions. *Transportation Research Part F*, 10(3), 177-186.
- Hockey, G. R. J. (1997). Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: A cognitive–energetical framework. *Biological Psychology*, 45, 73–93.
- Holloway, F.A. (1994). Low-dose alcohol effects on human behavior and performance : A review of post-1984 research. Office of Aviation Medicine Washington, D.C. 20591.
- Horwood, L.J. et Fergusson, D.M. (2000). Drink driving and traffic accidents in young people. *Accident Analysis & Prevention*, 32 (6), 805-814.
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Keall, M.D., Frith, W.J. et Patterson, T.L. (2004). The influence of alcohol, age and number of passengers on the night-time risk of driver fatal injury in New Zealand. *Accident Analysis & Prevention*, 36 (1), 49-61.
- Koelaga, H.S. (1995). Alcohol and vigilance performance : a review. *Psychopharmacology*, 118, 233-249.
- Lal, S. K., & Craig, A. (2001). A critical review of the psychophysiology of driver fatigue. *Biological psychology*, 55(3), 173-194.
- Lyvers, M. et Tobias-Webb, J. (2010). Effects of acute alcohol consumption on executive functioning in naturalistic settings. *Addictive Behaviors*, 35 (11), 1021-1028.
- Lewis-Evans, B. & Rothengatter, T. (2009). Task difficulty, risk, effort and comfort in a simulated driving task – Implications for Risk Allostasis Theory. *Accident Analysis and Prevention*, 41(5), 1053-1063.
- Mayhew, D. R., and Simpson, H. M. (1995). *The Role of Driving Experience: Implications for the Training and Licensing of New Drivers*. Toronto, ON: Insurance Bureau of Canada.
- Meister, D. (1976). *Behavioral Foundations of System Development*. New York: Wiley.
- Meskali, M., Berthelon, C., Marie, S., Denise, P., & Bocca, M. L. (2009). Residual effects of hypnotic drugs in aging drivers submitted to simulated accident scenarios: an exploratory study. *Psychopharmacology*, 207(3), 461-467.
- Morland, J., Steentoft, A., Wiese Simonsen, K., Ojanpera, I., Vuori, E., Magnusdottir, K., Kristinsson, J., Ceder, G., Kronstrand, R. et Christophersen, A. (2011). Drugs related to motor vehicle crashes in northern European countries : A study of fatally injured drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 43 (6), 1920-1926.
- Moskowitz, H., et Burns, M. (1990). Effects of alcohol on driving performance. *Alcohol Health & Research World*, 14 (1), 12-14.
- Moskowitz, H., Burns, M., Fiorentino, D., Smiley, A. et Zador, P. (2000). Driver characteristics and impairment at various BACs. U.S. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, D.C.
- Moskowitz, H. et Robinson, C.D. (1988). Effects of low doses of alcohol on driving-related skills: A review of the evidence. (Rapport n° DOT HS 807 280). U.S. Department of Transportation, Washington, DC.
- Movig, K.L., Mathijssen, M.P., Nagel, P.H., Van Egmond, T., DeGier, J.J., Leufkens, H.G. et Egberts, A.C. (2004). Psychoactive substance use and the risk of motor vehicle accidents. *Accident Analysis & Prevention*, 36 (4), 631-636.
- Mura, P., Kintz, P., Ludes, B., Gaulier, J.M., Marquet, P., Martin-Dupont, S., Vincent, F., Kaddour, A., Goullé, J.P., Nouveau, J., Moulsmas, M., Tilhet-Coartet, S., Pourrat, O. (2003). Comparison of the prevalence of alcohol, cannabis and other drugs between 900 injured drivers and 900 control subjects: results of a French collaborative study. *Forensic Science International*, 133 (1-2), 79-85.
- Ogden, E. J. et Moskowitz, H. (2004). Effects of alcohol and other drugs on driver performance. *Traffic Injury Prevention*, 5 (3), 185–198.

- ONISR (Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière) (2012). La sécurité routière en France. Bilan de l'année 2012. La documentation française, Paris, 112p.
- Owsley, C. et Mc Gwin, Jr. (2010). Vision and driving. *Vision Research* 50 (23), 2348-2361.
- Patten, C. J. D., Kircher, A., Östlund, J., Nilsson, L., and Svenson, O. (2006). Driver experience and cognitive workload in different traffic environments. *Accid. Anal. Prev.* 38, 887–894.
- Peck, R.C., Gebers, M.A., Voas, R.B. et Romano, E. (2008). The relationship between blood alcohol concentration (BAC), age, and crash risk. *Journal of Safety Research*, 39 (3), 311-319.
- Philip, P., Vervialle, F., Le Breton, P., Taillard, J., & Horne, J. A. (2001). Fatigue, alcohol, and serious road crashes in France: factorial study of national data. *Bmj*, 322(7290), 829-830.
- Posner, M. I. (1978). *Chronometric Explorations of Mind*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Quimby, A. R., and Watts, G. R. (1981). *Human Factors and Driving Performance (Laboratory Report 1004)*. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory.
- Ronen, A., Gershon, P., Drobiner, H., Rabinovich, A., Bar-Hamburger, R., Mechoulam, R., ... Shinar, D. (2008). Effects of THC on driving performance, physiological state and subjective feelings relative to alcohol. *Accident Analysis and Prevention*, 40(3), 926-934.
- Rossello, J., Munar, E., Justo, S., et Arias, R. (1999). Effects of alcohol on divided attention and on accuracy of attentional shift. *Psychology in Spain*, 3 (1), 66-74.
- Ryu, S. Y., Hirata, M., Sakihara, K., Kimura, K., Ebe, K., Yoshioka, M., ... & Yorifuji, S. (2007, June). Temporal dynamics of wakefulness during simulated driving. In *International Congress Series (Vol. 1300, pp. 429-432)*. Elsevier.
- Schneider, W., & Shiffrin, R.M. (1977). Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. *Psychological review*, 84(1), 1.
- Sher, K. J., Bartholow, B. D., Peuser, K., Erickson, D. J., & Wood, M. D. (2007). Stress-response-dampening effects of alcohol: Attention as a mediator and moderator. *Journal of Abnormal Psychology*, 116(2), 362-377.
- Singh, C.M., & Heberlein, U. (2000). Genetic control of acute ethanol-induced behaviors in drosophila. *Alcohol Clin Exp Research*, 24, 1127-1136
- Smit, A. S., Eling, P. A. T. M., & Coenen, A. M. L. (2004). Mental effort affects vigilance enduringly: after-effects in EEG and behavior. *International Journal of Psychophysiology*, 53(3), 239-243.
- Smith, S. S., Horswill, M. S., Chambers, B., & Wetton, M. (2009). Hazard perception in novice and experienced drivers: The effects of sleepiness. *Accident Analysis & Prevention*, 41(4), 729-733.
- Sobel, R., & Underhill, R. (1976). Family disorganization and teenage auto accidents. *Journal of safety research*, 8(1), 8-18.
- Thayer, R. E. (1967). Measurement of activation through self-report. *Monograph Supplement 1-V20. Psychological reports*, 20(2), 663-678.
- Thiffault, P., & Bergeron, J. (2003). Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study. *Accident Analysis & Prevention*, 35(3), 381–391.
- Ting, P. H., Hwang, J. R., Doong, J. L., & Jeng, M. C. (2008). Driver fatigue and highway driving: A simulator study. *Physiology & Behavior*, 94(3), 448-453.
- Tiplady, B., Degia, A. et Dixon, P. (2005). Assessment of driver impairment: Evaluation of a two-choice tester using ethanol. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 8 (4-5), 299-310.
- Vakulin, A., Baulk, S. D., Catcheside, P. G., Anderson, R., van den Heuvel, C. J., Banks, S., & McEvoy, R. D. (2007). Effects of moderate sleep deprivation and low-dose alcohol on driving simulator performance and perception in young men. *Sleep*, 30(10), 1327-1333.
- Van Elslande, P., Jaffard, M., Fouquet, K., & Fournier, J. Y. (2009). De la vigilance à l'attention: influence de l'état psychophysiologique et cognitive du conducteur dans les mécanismes d'accidents. *Salon-de-Provence: INRETS report no. 280*.
- Veldstra, J.L., Brookhuis, K.A., De Waard, D., Molmans, B.H., Verstraete, A.G., Skopp, G., et al. (2012) Effects of alcohol (BAC 0.5‰) and ecstasy (MDMA 100 mg) on simulated driving performance and traffic safety. *Psychopharmacology*, 222, 377-390.

- Verster, J.C., Wester, A.E., Goorden, M., van Wieringen, J-P., Olivier, B. et Volkerts, E.R. (2009). Novice drivers' performance after different alcohol dosages and placebo in the divided-attention steering simulator (DASS). *Psychopharmacology*, 204 (1), 127-133.
- Wallis, T., & Horswill, M. S. (2007). Using fuzzy signal detection theory to determine why experienced and trained drivers respond faster than novices in a hazard perception test. *Accident Analysis and Prevention*, 39(6), 1177-1185.
- West, R., Wilding, J., French, D., Kemp, R. et Irving, A. (1993). Effect of low and moderate doses of alcohol on driving hazard perception latency and driving speed. *Addiction*, 88 (4), 527-532.
- Wickens, C. D., and Hollands, J. G. (2000). *Engineering Psychology and Human Performance*, 3rd Edn. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Yerkes, R. M., & Dodson, J. D. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *Journal of comparative neurology and psychology*, 18(5), 459-482.
- Zador, P. L., Krawchuk, S. A., et Voas, R. B. (2000). Alcohol-related relative risk of driver fatalities and driver involvement in fatal crashes in relation to driver age and gender: An update using 1996 data. *Journal of Studies on Alcohol*, 61 (3), 387-395.

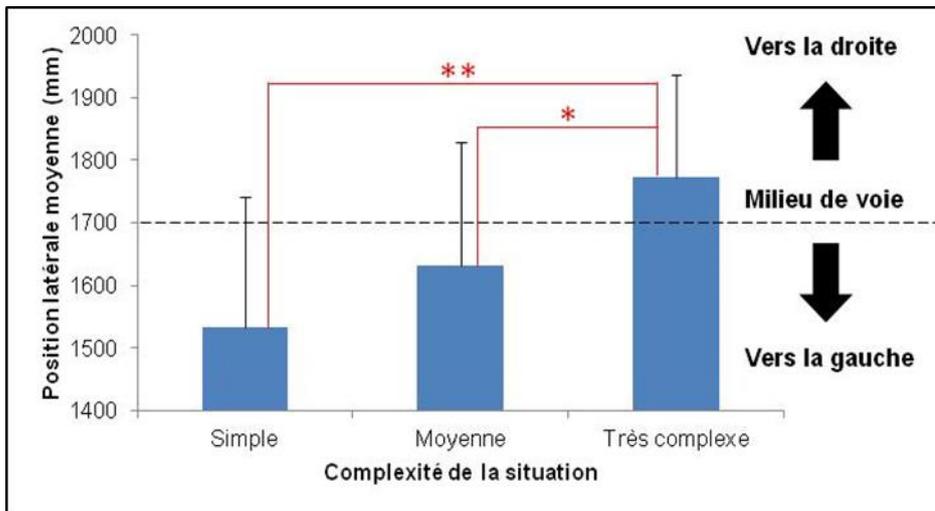
Annexe 1

Résultats de la première expérience, obtenus dans les portions sans piétons



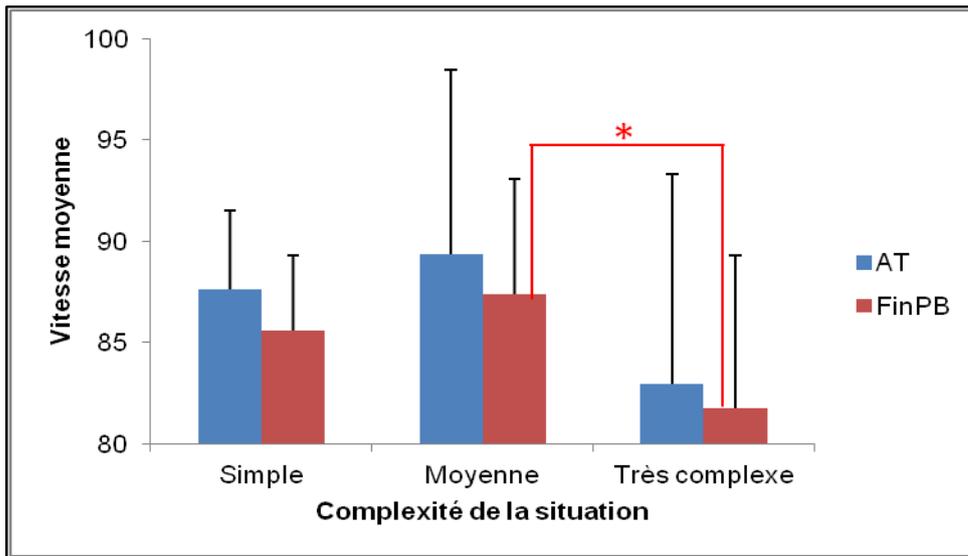
Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

Différentiel d'activité électrodermale (tension objective) en fonction de la complexité de la situation.



Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

Position latérale moyenne en fonction de la complexité de la situation.



Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

Vitesse moyenne (km/h) en fonction de l'expérience de conduite et de la complexité de la situation.

Vigilance subjective après chaque situation en fonction de l'expérience.

	Simple <i>M (SD)</i>	Moyenne <i>M (SD)</i>	Très complexe <i>M (SD)</i>
AT	.89 (.60)	1.18 (.78)	1.60 (1.08)
FinPB	1.26 (.70)	1.39 (.80)	1.36 (.54)

Analyse de régression simple : surcharge en fonction de l'expérience et de la situation

Effet de la charge subjective (a) et de la charge objective (différentiel de fréquence cardiaque) (b) sur l'écart-type de vitesse en fonction de l'expérience de conduite et de la complexité de la situation.

a	Simple	Moyenne	Très complexe
	β	β	β
AT	-0.50	.16	.05
FinPB	-.20	.18	-.09

b	Simple	Moyenne	Très complexe
	β	β	β
AT	-.13	-.11	-.31
FinPB	.46	-.04	-.43

Effet de la charge de travail subjective (a) et de la charge de travail objective (différentiel de fréquence cardiaque) (b) sur les SDLP en fonction de l'expérience de conduite et de la complexité de la situation.

a	Simple,	Moyenne,	Très complexe,
	β	β	β
AT	.26	.26	.22
FinPB	.17	.45	.13

b	Simple	Moyenne	Très complexe
	β	β	β
AT	-0.58	-.22	-.32
FinPB	.25	-.03	-.37

Résultats de la première expérience, obtenus dans les portions avec piétons

Analyse de régression simple : surcharge en fonction de l'expérience et de la situation

Effet de la charge de travail subjective (a) et de la charge de travail objective (différentiel de fréquence cardiaque) (b) sur les TR en fonction de l'expérience de conduite et de la complexité de la situation.

a	Simple	Moyenne	Très complexe
	β	β	β
AT	.14	.09	.16
FinPB	.20	-.10	.38 *

b	Simple	Moyenne	Très complexe
	β	β	β
AT	-.09	-.04	.05
FinPB	.06	-.02	.01

Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

Analyse de régression simple : surcharge en fonction de l'expérience et de la situation.

Effet de la charge de travail subjective (a) et de la charge de travail objective (différentiel de fréquence cardiaque) (b) sur le nombre de collisions en fonction de l'expérience de conduite et de la complexité de la situation.

a	Simple	Moyenne	Très complexe
	β	β	β
AT	.14	.48 **	.13
FinPB	.06	.16	.22

b	Simple	Moyenne	Très complexe
	β	β	β
AT	-.25	-.16	-.11
FinPB	.15	-.24	.02

Note : * $p < .05$; ** $p < .001$

Annexe 2

Résultats de la seconde expérience

Variables explicatives de la variable dépendante effort estimé subjectif

Tests des effets de modèle

Source	Type III		
	Khi-deux de Wald	ddl	Sig.
(Constante)	1599,248	1	0,000
Group	8,336	1	,004
alcool	4,164	2	,125
vigilance	66,152	1	,000
EEG	16,339	1	,000
Group * alcool	33,854	2	,000
Group * vigilance	24,829	1	,000
Group * EEG	4,224	1	,040
alcool * vigilance	,796	2	,672
alcool * EEG	43,116	2	,000
vigilance * EEG	6,514	1	,011

Variables explicatives de la variable dépendante vigilance estimée

Tests des effets de modèle

Source	Type III		
	Khi-deux de Wald	ddl	Sig.
(Constante)	586,196	1	0,000
Group	6,102	1	,014
alcool	11,527	2	,003
temps	7,074	7	,421
EEG	3,219	1	,073
Group * alcool	,085	2	,958
Group * temps	3,478	7	,838
alcool * temps	1,043	14	1,000
alcool * EEG	,993	2	,609
Group * EEG	50,777	1	,000
temps * EEG	15,170	7	,034

Variable dépendante : vigilance

Modèle : (Constante), Group, alcool, temps, EEG, Group * alcool, Group * temps, alcool * temps, alcool * EEG, Group * EEG, temps * EEG

Variables explicatives de la variable dépendante position latérale

Source	Type III		
	Khi-deux de Wald	ddl	Sig.
(Constante)	2635,370	1	0,000
Group	4,730	1	,030
alcool	,546	2	,761
temps	5,381	7	,614
Effort	,029	1	,865
EEG	,157	1	,692
vigilance	,036	1	,850
Group * alcool	4,803	2	,091
Group * temps	5,488	7	,601
Group * Effort	4,929	1	,026
Group * EEG	6,677	1	,010
Group * vigilance	,074	1	,786
alcool * temps	10,381	14	,734
alcool * Effort	1,403	2	,496
alcool * EEG	1,075	2	,584
alcool * vigilance	2,451	2	,294
temps * Effort	8,073	7	,326
temps * EEG	14,222	7	,047
temps * vigilance	1,361	7	,987
Effort * EEG	,012	1	,914
Effort * vigilance	,008	1	,928
EEG * vigilance	,250	1	,617

Variable dépendante : lp

Modèle : (Constante), Group, alcool, temps, Effort, EEG, vigilance, Group * alcool, Group * temps, Group * Effort, Group * EEG, Group * vigilance, alcool * temps, alcool * Effort, alcool * EEG, alcool * vigilance, temps * Effort, temps * EEG, temps * vigilance, Effort * EEG, Effort * vigilance, EEG * vigilance

Variables explicatives de la variable dépendante SDLP

Tests des effets de modèle

Source	Type III		
	Khi-deux de Wald	ddl	Sig.
(Constante)	20,601	1	,000
Group	4,260	1	,039
alcool	,877	2	,645
temps	3,026	7	,883
EEG	23,217	1	,000
vigilance	4,846	1	,028
Effort	29,462	1	,000
Group * alcool	,877	2	,645
Group * temps	6,396	7	,494
Group * EEG	,000	1	,985
Group * vigilance	18,746	1	,000
Group * Effort	,232	1	,630
alcool * temps	8,886	14	,838
alcool * EEG	11,747	2	,003
alcool * vigilance	,569	2	,752
alcool * Effort	5,411	2	,067
temps * EEG	31,488	7	,000
temps * vigilance	4,766	7	,689
temps * Effort	3,118	7	,874
EEG * vigilance	,020	1	,889
EEG * Effort	17,539	1	,000
vigilance * Effort	10,859	1	,001

Variable dépendante : sdlpModèle : (Constante), Group, alcool, temps, EEG, vigilance, Effort, Group * alcool, Group * temps, Group * EEG, Group * vigilance, Group * Effort, alcool * temps, alcool * EEG, alcool * vigilance, alcool * Effort, temps * EEG, temps * vigilance, temps * Effort, EEG * vigilance, EEG * Effort, vigilance * Effort

Variables explicatives de la variable dépendante vitesse

Tests des effets de modèle

Source	Type III		
	Khi-deux de Wald	ddl	Sig.
(Constante)	12163,696	1	0,000
Group	4,483	1	,034
alcool	15,168	2	,001
temps	5,377	7	,614
Effort	,631	1	,427
EEG	2,081	1	,149
vigilance	,140	1	,708
Group * alcool	6,066	2	,048
Group * temps	4,735	7	,692
Group * Effort	2,322	1	,128
Group * EEG	,752	1	,386
Group * vigilance	10,935	1	,001
alcool * temps	10,785	14	,703
alcool * Effort	41,158	2	,000
alcool * EEG	11,689	2	,003
alcool * vigilance	9,063	2	,011
temps * Effort	5,671	7	,579
temps * EEG	5,229	7	,632
temps * vigilance	1,623	7	,978
Effort * EEG	1,640	1	,200
Effort * vigilance	1,644	1	,200
EEG * vigilance	,449	1	,503

Variable dépendante : vitesse

Modèle : (Constante), Group, alcool, temps, Effort, EEG, vigilance, Group * alcool, Group * temps, Group * Effort, Group * EEG, Group * vigilance, alcool * temps, alcool * Effort, alcool * EEG, alcool * vigilance, temps * Effort, temps * EEG, temps * vigilance, Effort * EEG, Effort * vigilance, EEG * vigilance

Variables explicatives de la variable dépendante SD vitesse

Tests des effets de modèle

Source	Type III		
	Khi-deux de Wald	ddl	Sig.
(Constante)	4,580	1	,032
Group	,853	1	,356
alcool	7,269	2	,026
temps	3,696	7	,814
EEG	27,703	1	,000
vigilance	2,267	1	,132
Group * alcool	9,982	2	,007
Group * temps	4,588	7	,710
Group * EEG	,441	1	,507
Group * vigilance	8,722	1	,003
alcool * temps	5,952	14	,968
alcool * EEG	14,742	2	,001
alcool * vigilance	,548	2	,760
temps * EEG	8,322	7	,305
temps * vigilance	1,458	7	,984
EEG * vigilance	,557	1	,456
Effort	7,436	1	,006
Group * Effort	,291	1	,589
alcool * Effort	30,383	2	,000
temps * Effort	6,875	7	,442
EEG * Effort	24,745	1	,000
vigilance * Effort	,627	1	,428

Variable dépendante : sdvitesse

Modèle : (Constante), Group, alcool, temps, EEG, vigilance, Group * alcool, Group * temps, Group * EEG, Group * vigilance, alcool * temps, alcool * EEG, alcool * vigilance, temps * EEG, temps * vigilance, EEG * vigilance, Effort, Group * Effort, alcool * Effort, temps * Effort, EEG * Effort, vigilance * Effort

Variables explicatives de la variable dépendante EDA

Tests des effets de modèle

Source	Type III		
	Khi-deux de Wald	ddl	Sig.
(Constante)	,000	1	,988
Group	,008	1	,929
alcool	,024	2	,988
temps	73,725	7	,000
Group * alcool	,016	2	,992
Group * temps	7,351	7	,393
alcool * temps	48,403	14	,000

Variable dépendante : EDA

Modèle : (Constante), Group, alcool, temps, Group * alcool, Group * temps, alcool * temps

Variables explicatives de la variable dépendante ECG

Tests des effets de modèle

Source	Type III		
	Khi-deux de Wald	ddl	Sig.
(Constante)	,001	1	,975
Group	,005	1	,942
alcool	,009	2	,995
temps	24,070	7	,001
Group * alcool	,003	2	,999
Group * temps	9,736	7	,204
alcool * temps	13,131	14	,516

Variable dépendante : ECG

Modèle : (Constante), Group, alcool, temps, Group * alcool, Group * temps, alcool * temps

Variables explicatives de la variable dépendante EEG

Tests des effets de modèle

Source	Type III		
	Khi-deux de Wald	ddl	Sig.
(Constante)	272,777	1	0,000
alcool	8,641	2	,013
Group	44,391	1	,000
temps	9,389	7	,226
vigilance	,271	1	,603
Group * alcool	4,961	2	,084
Group * temps	2,846	7	,899
alcool * temps	11,429	14	,652
alcool * vigilance	8,888	2	,012
Group * vigilance	41,607	1	,000
temps * vigilance	3,107	7	,875

Variable dépendante : EEG

Modèle : (Constante), alcool, Group, temps, vigilance, Group * alcool, Group * temps, alcool * temps, alcool * vigilance, Group * vigilance, temps * vigilance