

Charge cognitive et attention en conduite de train à grande vitesse

Marine Léveillé¹, Olivier Salvon², Jean-Michel Boucheix¹, Nicolas Renoir³

marine.leveille@sncf.fr, olivier.salvon@sncf.fr, jean-michel.boucheix@u-bourgogne.fr, nicolas.renoir@sncf.fr

¹ Université de Bourgogne, LEAD/CNRS, UMR 5022, Pôle AAFE, Esplanade Erasme, 21000 Dijon.

² SNCF Voyageurs, ET Traction TGV Sud-Est, UP Voyages BFC, 31 bis Cour de la Gare, 21000 Dijon

³ SNCF Innovation & Recherche, Immeuble Le Jade, 1-3 avenue François Mitterrand, 93000 La Plaine Saint-Denis.

Notre objectif était d'identifier des situations de sous-charge cognitive en conduite de TGV. Dans une première étude, 13 conducteurs équipés d'un eye-tracker ont conduit un TGV en conditions réelles. Des mesures subjectives (autoévaluation) et objectives (taux et durée des fixations oculaires) de leur charge cognitive ont été récoltées. Dans une seconde étude, 5 conducteurs équipés d'un eye-tracker ont réalisé un scénario de conduite en simulateur de TGV haute-fidélité. Des mesures objectives (pupillométrie, taux et durée des fixations) de leur charge cognitive ont été récoltées. L'attention pendant la conduite a été étudiée via la répartition spatiale du regard. Les autoévaluations et la pupillométrie se sont montrées très sensibles aux variations de charge, contrairement au taux et à la durée des fixations. Nos résultats indiquent que les périodes de conduites monotones et de faible charge de travail engendrent de la sous-charge cognitive et des diminutions de l'attention.

Mots-clés : conduite de train, oculométrie, charge cognitive, attention

Mental workload and attention when driving a high-speed train

This study set out to identify situations of cognitive underload in high-speed train driving. In a first study, 13 drivers equipped with an eye-tracker drove a high-speed train in real conditions. Subjective (self-assessment) and objective (rate and duration of eye-fixation) measurements of cognitive load were collected. In a second study, 5 drivers equipped with an eye-tracker done a driving scenario in a high-fidelity high-speed train simulator. Objective measurements (pupillometry, eye-fixation rate and duration) of cognitive load were collected. Attention during driving was studied with the spatial distribution of the gaze. Self-assessments and pupillometry proved to be very sensitive to cognitive workload variations, in contrast to eye-fixation rate and duration. Our results suggest that periods of monotonous driving and low workload lead to cognitive underload and decreased attention.

Keywords: train driving, eye-tracking, mental workload, attention

*Ce texte original a été produit dans le cadre du congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française qui s'est tenu à Paris, les 16, 17 et 18 septembre 2020. Il est permis d'en faire une copie papier ou digitale pour un usage pédagogique ou universitaire, en citant la source exacte du document, qui est la suivante :

Léveillé, M., Salvon, O., Boucheix, J.M. & Renoir, N. (2020). Charge cognitive et attention en conduite de train à grande vitesse. Actes du 55ème Congrès de la SELF, L'activité et ses frontières. Penser et agir sur les transformations de nos sociétés. Paris, 16, 17 et 18 septembre 2020

Aucun usage commercial ne peut en être fait sans l'accord des éditeurs ou archiveurs électroniques. Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page.

INTRODUCTION

Dans le domaine des transports (ferroviaire, aérien, routier), l'activité demande aux opérateurs de rester vigilants et attentifs pendant de longues périodes et de réagir immédiatement face à des signaux critiques ou des événements inhabituels (Edkins & Pollock, 1997). Les opérateurs sont confrontés à des tâches de surveillance (supervision) intrinsèquement monotones, en relation avec les progrès technologiques croissants dont l'automatisation. Cependant, la monotonie affecterait le maintien de la vigilance et de l'attention pendant de longues périodes de conduite (Gabon, Ignazi, Mollard et Coblenz, 1993), et associée à une faible charge de travail elle a des effets néfastes sur la performance de conduite (Dunn et Williamson, 2012). Les situations de conduite monotones sont trop peu exigeantes du point de vue de la tâche à effectuer. Ceci engendre un coût pour l'opérateur qui ne permet pas de rentabiliser le travail cognitif, c'est le niveau de « sous-charge cognitive » (Wiener & Curry, 1984). Si l'identification de la sous-charge cognitive en conduite de train est un enjeu du point de vue de la fiabilité et de la sécurité, il y a peu de travaux dans la littérature scientifique à ce sujet. C'est pourquoi nous avons mené des expérimentations visant à mettre en évidence la sous-charge cognitive en conduite de TGV réelle et simulée. Nous avons utilisé un protocole de mesure basé sur l'utilisation d'un eye-tracker permettant d'enregistrer les mouvements oculaires des conducteurs (répartition de l'attention) ainsi que le diamètre pupillaire (mesure objective de la charge cognitive), associé à des évaluations subjectives.

Caractéristiques de l'activité de conduite de train à grande vitesse

L'environnement de conduite de train est complexe et dynamique (Naweed, 2014). Même si le mode guidé simplifie la tâche des conducteurs, chargés principalement du contrôle de la vitesse du train, cette activité repose sur de longues périodes de conduite pendant lesquelles l'opérateur doit rester attentif et reconnaître différents signaux et stimuli afin d'y répondre, et ce en respectant les horaires imposés et des règles de sécurité. La tâche centrale de l'opérateur est la gestion de la traction et du freinage afin de maintenir la vitesse du train dans les limites autorisées et ainsi éviter des perturbations de la circulation ferroviaire (retards, incidents de sécurité). Le système de signalisation ferroviaire est basé sur l'anticipation en raison des longues distances de freinage nécessaires pour stopper ou ralentir le train. La conduite de train nécessite donc que le conducteur utilise principalement la stratégie anticipatrice, favorisée par la connaissance des itinéraires et du profil de la ligne. Dans le cas des TGV, l'activité de conduite diffère selon le type de ligne empruntée. Lorsque les TGV circulent sur les lignes dites conventionnelles (LC), les conducteurs doivent respecter la même vitesse que les autres trains (TER, Intercités, Fret) ainsi que la signalisation latérale extérieure. Le conducteur doit non seulement reconnaître les signaux dans le flux optique, mais aussi les mémoriser afin d'appliquer leur signification une fois arrivé au point d'exécution. En pratique, les agents de conduite TGV sont d'anciens conducteurs de train TER ou FRET avec en moyenne une vingtaine d'années d'expérience de conduite en LC. Ils bénéficient donc d'une parfaite connaissance des caractéristiques de ces itinéraires. Les lignes à grande

vitesse (LGV) ont spécialement été conçues pour que les TGV puissent circuler jusqu'à 320 km/h. À une telle vitesse, le système visuel ne peut pas percevoir correctement la signalisation latérale extérieure comme sur LC. C'est pourquoi la signalisation est « embarquée », c'est-à-dire qu'elle est affichée en permanence dans la cabine de conduite grâce à un système de transmission voie-machine : on parle de « conduite à l'affichage ». Aussi, la conduite sur LGV implique de longues périodes pendant lesquelles la seule tâche de l'opérateur est de maintenir la vitesse du train dans les limites autorisées.

La monotonie, une caractéristique inhérente au travail des conducteurs

Une situation peut être qualifiée de monotone lorsque les stimulations sont constantes, très répétitives ou prévisibles. Si la conduite d'un TGV comporte de courtes périodes avec une charge de travail élevée, elle implique aussi des périodes prolongées d'activité répétitives avec une faible charge (Sussman & Copen, 2000), en particulier sur LGV. En effet, les situations de conduite sur LGV sont très monotones car les stimulations sont peu nombreuses (affichage de la signalisation en cabine) et prévisibles (connaissance de l'itinéraire). Sur LC, les stimulations sont nombreuses (signalisation hors de la cabine) mais tout autant prévisibles (connaissance de l'itinéraire). La contribution de la monotonie dans la causalité des accidents ferroviaires a depuis longtemps été évoquée (Edkins et Pollock, 1997). L'expérience subjective de la monotonie est associée à des sentiments d'ennui et de fatigue, à une perte d'intérêt pour la tâche à réaliser et à un désir de changement. Dünn & Williamson (2012) ont montré les effets néfastes de la combinaison de la monotonie et de la faible charge de travail sur la performance de conduite de train. Ces effets se sont manifestés par une augmentation du nombre d'erreurs dès quinze minutes de conduite monotone en simulateurs. En effet, les conditions monotones et de faible charge de travail engendrent de la fatigue passive (liée à la tâche). Il en résulterait une dégradation de la performance, due à une sous-estimation du niveau de l'effort requis pour maintenir une performance optimale (Matthews & Desmond, 2002). Il est bien connu qu'il est plus difficile de maintenir une attention soutenue dans une situation monotone que dans une situation à plus fortes demandes cognitives (Langner et Eickhoff, 2013). Un processus dont les paramètres dérivent rarement et faiblement requiert une activité élevée de surveillance mais est moins exigeant en matière de diagnostic et d'anticipation. Dans ce cas de stabilité du processus, le risque d'une baisse de vigilance est une conséquence majeure. En conduite ferroviaire, les épisodes d'hypovigilance surviendraient majoritairement lors de phases très monotones de la conduite telles que les moments d'attente à un feu rouge ou pendant les croisières (Gabon, Ignazi, Mollard et Coblenz, 1993).

Vigilance et attention : des processus clés en conduite de train

La vigilance concerne l'intensité de l'attention, elle désigne la capacité à maintenir une attention soutenue pendant de longues durées (Parasuraman, Warm & Dember, 1987). La vigilance des conducteurs de train peut être dégradée par des facteurs endogènes (par exemple, les privations de sommeil liées à l'organisation du travail) ou par des facteurs

exogènes tels que la monotonie. Pour tenter de fournir une assistance aux problèmes de vigilance des conducteurs de train, les compagnies ferroviaires ont introduit des dispositifs dits « de vigilance » : la Veille Automatique à Contrôle de Maintien d'Appui (VACMA) et la répétition des signaux par crocodile. Cependant, les conducteurs seraient capables de réagir à ces dispositifs pendant des phases de très faible éveil et de vigilance, la réaction devenant automatique et ne nécessitant pas d'intervention consciente de la part du conducteur. Il n'existe donc aucun système en cabine permettant d'attester avec certitude que le conducteur est vigilant pendant la conduite. La vigilance n'est pas la seule composante de l'attention mise en jeu dans les activités de conduite. Les ressources attentionnelles étant limitées, la fonction de sélection de l'information joue un rôle prépondérant dans l'activité de conduite en permettant au conducteur de faire le tri dans la multitude d'informations disponibles dans son environnement pour ne sélectionner que les informations pertinentes à la tâche en cours. Il ne suffit donc pas d'être vigilant pour que l'attention soit « efficace », au sens où les ressources sont dirigées vers les stimuli pertinents à la tâche en cours. C'est pourquoi dans ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement à l'attention sélective des conducteurs.

Charge cognitive et expertise en conduite de train

En ergonomie, la charge cognitive fait référence à la quantité de sollicitations auxquelles l'opérateur doit répondre et à la façon dont il va y répondre (Martin, 2013). Le niveau de charge est en partie conditionné par les ressources mobilisables par l'opérateur, qui correspondent en fait à son attention et à la composante intensive de l'activité. En faisant appel aux ressources cognitives, l'opérateur module l'attention et l'énergie déployées afin de réaliser une tâche et cela traduit la présence d'un effort mental. La gestion de la charge cognitive par l'opérateur vise à maintenir son niveau dans des valeurs acceptables situées entre deux bornes extrêmes : le niveau de surcharge et le niveau de sous-charge. Le niveau de surcharge correspond au seuil maximal de ressources mobilisables par un opérateur pour répondre aux exigences d'une tâche tandis que le niveau de sous-charge (Wiener & Curry, 1984) est atteint lorsque le niveau d'exigence de la tâche est trop faible pour que le coût engendré permette de rentabiliser le travail cognitif. Dans ce cas, l'opérateur est en « phase d'endormissement cognitif » (Martin, 2013) et risque de ne pas être en mesure de répondre efficacement aux exigences de la tâche. Nous pensons que c'est le cas des conducteurs de TGV lors des longues périodes de conduite monotones et de faible charge de travail, en particulier sur LGV. Nous faisons l'hypothèse que dans de telles conditions de sous-charge cognitive, le déploiement et le maintien dans le temps d'une attention efficace de la part des conducteurs pourraient être compromis. Notre hypothèse s'appuie sur le fait que la conduite de train est une activité experte. Le modèle de régulation de l'activité « SRK » (Rasmussen, 1986) postule l'existence d'un niveau de régulation de l'activité propre à l'expert : la régulation par les automatismes (« Skill-Based »). Ce niveau nécessite peu ou pas de contrôle attentionnel et le coût cognitif d'exécution est minimal. Cependant, lorsque la situation s'écarte des attentes implicites,

l'automatisme doit être interrompu pour réguler l'activité à un niveau supérieur : la régulation par les règles (« Rule-Based ») ou par les connaissances (« Knowledge-Based ») (Rasmussen, 1986). Dans le cas d'une activité experte telle que la conduite de TGV (les conducteurs ont en moyenne une vingtaine d'années d'expérience en conduite de train), où les automatismes occupent une grande place, ces interruptions seraient difficiles à réaliser à cause d'une « rigidification de l'activité » due à l'automatisation.

Comment évaluer l'attention et la charge cognitive des conducteurs ?

L'oculométrie est une technique non invasive et non distrayante permettant d'enregistrer les mouvements oculaires des observateurs. De récentes recherches en situation écologique de conduite de train (Horiguchi, Suzuki, Sawaragi, Nakanishi & Takimoto, 2016) ont utilisé l'oculométrie afin d'étudier les stratégies de perception visuelle des conducteurs. Compte tenu du lien naturel entre les mouvements des yeux et le foyer de l'attention visuelle, l'analyse et l'interprétation des données issues de l'oculométrie peuvent être davantage approfondies. En effet, les mouvements oculaires constitueraient un moyen simple et objectif d'étudier comment l'attribution de l'attention est liée à la performance de la tâche, en dehors des environnements induits par le laboratoire (Merat, Mills, Bradshaw, Everatt & Groeger, 2002). Certains oculomètres permettent également de recueillir les variations de taille de la pupille des observateurs. La pupille reflète l'activité du système nerveux autonome et est donc un excellent indicateur pour mesurer la charge cognitive. De nombreuses recherches ont montré que le diamètre pupillaire est plus grand lorsque la charge mentale est élevée (Szulewski, Roth & Howes, 2015). La dilatation de la pupille étant difficile à contrôler volontairement, cela en fait une mesure totalement objective. Cependant, l'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de la pupille aux variations de luminosité, qui limite considérablement son interprétation dans un environnement naturel tel que la cabine de conduite de train. En revanche, dans des environnements hautement contrôlables comme les simulateurs de conduite, les résultats des études utilisant la pupillométrie sont cohérents et valides (Marquart, Cabrall & De Winter, 2015). La pupillométrie est souvent corrélée avec le taux et la durée des fixations oculaires, qui augmentent généralement en même temps que les exigences mentales de la tâche. L'objectif de ce travail est d'identifier des situations de sous-charge cognitive et de faible attention pendant la conduite (réelle et simulée) d'un TGV. Pour cela, nous proposons un protocole expérimental dans lequel l'attention des conducteurs sera étudiée à travers la répartition de leurs mouvements oculaires (en relation avec les tâches de conduite) et la charge cognitive sera évaluée au moyen de la pupillométrie (uniquement en simulateurs de conduite, pour les raisons évoquées précédemment), associée à l'analyse du taux et de la durée des fixations oculaires et d'un outil plus subjectif de mesure de la charge perçue. Nous postulons que les situations de conduite monotones et de faible charge de travail engendrent de la sous-charge cognitive et des diminutions de l'attention.

ÉTUDE 1: SITUATION DE CONDUITE NATURELLE

Objectif

L'objectif de cette première étude en situation naturelle de conduite de TGV était de comparer le niveau de charge cognitive et d'attention des conducteurs (en utilisant l'oculométrie et un outil subjectif d'évaluation de la charge perçue) pendant des périodes de conduite sélectionnées pour leur caractère monotone et leur faible charge de travail, avec des périodes à plus forte charge de travail.

Méthode

13 agents de conduite de sexe masculin (M = 50 ans, ET = 2.84) équipés d'un eye-tracker permettant d'enregistrer leurs mouvements oculaires, ont conduit un TGV sur l'itinéraire Dijon-Paris (1h30). Le nombre moyen d'années d'expérience en conduite de train était d'environ 25 ans (ET = 2.46). Une analyse préalable des tâches de conduite sur ce trajet nous a permis de cibler certaines périodes de conduite en fonction de la charge de travail et du degré de monotonie associés. Au total, sur l'itinéraire, six séquences de 5 minutes ont été sélectionnées (Figure 1). L'activité de conduite n'étant pas la même selon le type de ligne (LC ou LGV) nous avons sélectionné pour chacune trois périodes de conduite avec des niveaux de charge de travail différents (très faible, faible et élevé). La charge cognitive (subjective) des participants a été recueillie a posteriori par auto-évaluation via une échelle numérique (estimation de l'effort mental perçu entre 0 et 10). La charge cognitive (objective) a été mesurée avec le taux et la durée des fixations oculaires. L'attention pendant la conduite a été étudiée en analysant la répartition des fixations oculaires dans différentes zones d'intérêts (Figure 2).



Figure 1. Timeline de l'itinéraire avec les six séquences étudiées. Le signe « + » signifie que la période est associée à une forte charge de travail et le signe « - » à une faible charge de travail et de la monotonie.



Figure 2. 8 aires d'intérêts (AOI) ont été étudiées (AOI 1-3 : vue extérieure ; AOI 4-8 : instruments en cabine)

Résultats

Pour chaque variable dépendante (score d'effort mental perçu, nombre et durée totale des fixations oculaires) les comparaisons de périodes effectuées dans les analyses sont les suivantes : LC1, LC2 vs LC3 et LGV1, LGV2 vs LGV3. Les comparaisons de périodes effectuées avec le test de Wilcoxon sur les scores d'effort mental perçu (Tableau 1) étaient toutes significatives ($p < .02$). Concernant, le nombre et la durée des fixations oculaires, aucune différence

significative entre les périodes n'a été trouvée ($p > .05$).

Tableau 1. Moyennes (et écarts-types) du score d'effort mental perçu en fonction de la période de conduite

LC1	LC2	LC3	LGV1	LGV2	LGV3
1.56	2	4.56	2.22	1.56	4.11
(1.42)	(1)	(2.40)	(1.79)	(1)	(2.47)

Analyse de la répartition des fixations oculaires en fonction des zones d'intérêts (AOI). Une ANOVA a montré des différences significatives du nombre de fixations oculaires en fonction des AOI (AOI 123 vs AOI 45678) et en fonction des périodes de conduite ; $F(5,40) = 6.42, p < .0002$ (Figure 3). Des ANOVAs de Friedman ont montré un effet significatif du facteur Période LC (LC1 vs LC2 vs LC3) et LGV (LGV1 vs LGV2 vs LGV3) sur le nombre de fixations en AOI 4 (indicateur de vitesse) ; respectivement, $\chi^2(9.2) = 6.89, p < .03$ et $\chi^2(9.2) = 9.56, p < .008$.

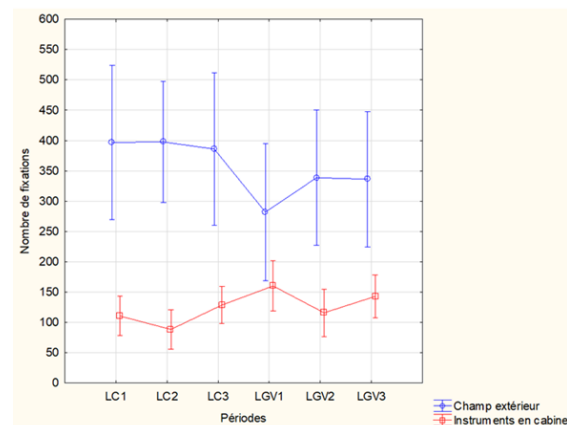


Figure 3. Graphique du nombre de fixations oculaires dans le champ extérieur et sur les instruments en cabine en fonction des périodes de conduite

Discussion

Concernant les mesures subjectives de la charge mentale (auto-évaluations), nous avons obtenu des résultats significatifs qui tendent à vérifier nos hypothèses. Les périodes de conduite identifiées comme monotones et avec une faible charge de travail sur LC (LC1 et LC2) et sur LGV (LGV1 et LGV2) ont demandé un effort mental moins important aux conducteurs que les périodes caractérisées par une forte charge de travail (LC3 et LGV3). Cependant, nous n'avons pas obtenu de résultats significatifs concernant les mesures objectives de la charge mentale (nombre et durée des fixations oculaires). Dans une revue de littérature sur l'évaluation de la charge mentale en conduite automobile, Marquart, Cabrall et De Winter (2015) évoque la difficulté à différencier les effets de la charge cognitive de ceux liés à la charge visuelle sur les taux et durées des fixations. Ce pourrait expliquer le manque de significativité des résultats, la charge mentale et visuelle étant très liée dans les activités de conduite. En ce qui concerne la répartition de l'attention visuelle des participants pendant la tâche de conduite, la période LGV1 a été identifiée comme monotone et avec une faible charge de travail, la tâche principale du conducteur étant la gestion de la vitesse en fonction des variations du profil. La répartition des fixations oculaires des conducteurs

pendant cette période est cohérente avec cette tâche : les conducteurs ont davantage attribué leur attention aux instruments en cabine (en particulier l'indicateur de vitesse et le cab-signal) qu'à l'extérieur du train. La période de conduite LGV2 a été identifiée comme très monotone et avec une très faible charge de travail, la seule tâche du conducteur étant la surveillance et le maintien de la vitesse autorisée en fonction du profil, ne présentant que très peu de variations. Logiquement, la répartition des fixations pendant LGV2 aurait dû être similaire à la répartition des fixations pendant LGV1. Pourtant, pendant LGV2, les conducteurs ont attribué moins d'attention à l'indicateur de vitesse et au cab-signal (pourtant centraux dans la tâche de gestion de la vitesse) et davantage à l'extérieur du train. Ainsi, l'attention des conducteurs pendant LGV2 semblait « flottante » ou tout du moins peu concentrée sur la tâche à réaliser. Cette observation peut être mise en relation avec les études sur le vagabondage de la pensée. Il a été démontré que la monotonie menait à un découplage de l'attention de la tâche et à l'apparition du vagabondage de la pensée ou de la rêverie (Helton & Russell, 2012). Dans ce cas, la tâche est effectuée sur un mode automatique, tandis que le centre de l'attention se tourne vers des pensées personnelles.

ÉTUDE 2: SITUATION DE CONDUITE DE SIMULÉE

Objectif

L'objectif de cette deuxième étude en simulateurs de conduite de TGV était de comparer le niveau de charge cognitive et d'attention des conducteurs (en utilisant l'oculométrie couplée à la pupillométrie) pendant une période de conduite choisie pour sa monotonie et sa faible charge de travail avec trois autres périodes à plus forte charge de travail.

Méthode

5 conducteurs de sexe masculin équipés d'un eye-tracker ont réalisé un scénario de conduite (30 min) sur LGV dans un simulateur de conduite TGV haute-fidélité (Figure 5). Leur profil était similaire concernant l'âge et l'expérience en conduite de train. Comme dans la première étude, nous avons ciblé certaines périodes de conduite en fonction de la charge de travail et du degré de monotonie associés. Au total, quatre séquences de moins de 5 minutes ont été sélectionnées (Figure 4). La charge cognitive (objective) des participants a été mesurée avec la dilatation pupillaire et le taux et la durée des fixations oculaires. L'attention pendant la conduite a été étudiée en analysant la répartition des fixations oculaires des conducteurs dans différentes zones d'intérêts (les mêmes que dans la première étude).



Figure 4. Timeline du scénario de conduite avec les quatre séquences étudiées. Le signe « + » signifie que la séquence est associée à une forte charge de travail et le signe « - » à une faible charge. La période E correspond au raccordement de la LC à la LGV. La période I correspond à un incident volontairement provoqué en fin de scénario.



Figure 5. Illustration du dispositif expérimental en simulateur de conduite de TGV

Résultats

Une ANOVA de Friedman a montré un effet significatif du facteur Période sur les variations de taille de la pupille (par rapport à une valeur de référence), $\chi^2(5,4) = 10.72, p < .03$ (Figure 6). Les tests de Wilcoxon ont montré une différence significative du diamètre pupillaire entre LGV- et E ($Z = 2.02, p < .05$) ainsi que des différences marginales entre LGV- et LGV+ ($Z = 1.75, p < .08$), entre LGV- et I ($Z = 1.75, p < .08$). Concernant le nombre et la durée des fixations oculaires, aucune différence significative entre les périodes n'a été trouvée ($p > .05$).

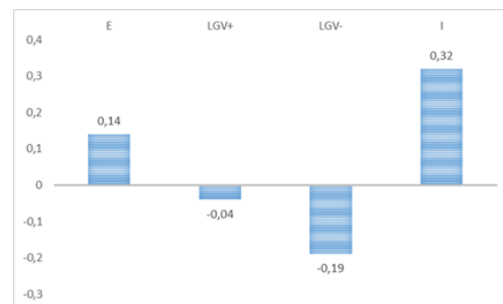


Figure 6. Histogramme des moyennes des variations du diamètre pupillaire (en millimètres) en fonction de la période de conduite (E vs LGV+ vs LGV- vs I)

Analyse de la répartition des fixations oculaires en fonction des zones d'intérêts (AOI). Les ANOVA de Friedman ont montré un effet significatif du facteur Période (E vs LGV+ vs LGV-) sur le nombre de fixations en AOI 1, 2 et 3 (écran) ($\chi^2(5,2) = 6.4, p < .04$), sur le nombre de fixations en AOI 4 (indicateur de vitesse) ($\chi^2(5,2) = 8.59, p < .02$) et sur le nombre de fixations en AOI 5 (cab signal) ($\chi^2(5,2) = 7.9, p < .02$).

Discussion

Les fluctuations du niveau de charge mentale mises en évidence avec les variations de taille de la pupille tendent à vérifier notre hypothèse. En effet, la pupille des conducteurs était en moyenne plus contractée (et donc la charge cognitive moins importante) pendant la période de conduite monotone et de faible charge de travail (LGV-) que pendant les périodes à plus forte charge de travail (E, LGV+, I). Suivant les comparaisons de périodes effectuées, nous avons obtenu des résultats significatifs alors que les analyses ont été réalisées sur les données de cinq participants seulement. Cela suggère que la pupille a fortement réagi aux variations de la demande cognitive pendant la tâche de conduite. Les effets cognitifs sur la taille de la pupille sont d'environ 0,5 millimètre ou moins. Avec une variation du diamètre pupillaire d'environ -0,19 millimètre (par rapport à la

valeur de référence), la période LGV- représentait pour les conducteurs une situation de sous-charge cognitive. À l'inverse, l'incident provoqué à la fin du scénario de conduite (I) représentait pour les conducteurs une situation de surcharge cognitive avec une variation du diamètre pupillaire d'environ +0.32 millimètre. Cette importante différence s'explique car l'incident était complètement inattendu et il se produisait juste après une période de conduite très monotone (LGV-). Comme dans la première étude, nous n'avons pas obtenu de résultats significatifs concernant la mesure de la charge mentale avec le nombre et la durée des fixations oculaires (cf. Marquart, Cabrall et De Winter, 2015). Concernant la répartition de l'attention, nous avons trouvé que les conducteurs regardaient plus l'indicateur de vitesse pendant la période LGV- que pendant les autres périodes (LGV+ et E), ce qui est cohérent avec l'activité de conduite durant cette période, consistant exclusivement à surveiller et réguler la vitesse du train. Cependant, les conducteurs regardaient aussi plus à l'extérieur de la cabine (l'écran) pendant la période LGV- que pendant les autres périodes et moins la signalisation affichée en cabine (cab-signal).

CONCLUSION ET MISE EN PERSPECTIVE

Les résultats obtenus nous confortent dans l'idée que les situations de conduite monotones avec une faible charge de travail engendrent de la sous-charge cognitive et des difficultés de maintien de l'attention. Les autoévaluations des conducteurs (étude 1) et la pupillométrie (étude 2) se sont révélées très sensibles aux variations du niveau de charge cognitive des conducteurs et ont permis de valider nos hypothèses, contrairement aux taux et à la durée des fixations oculaires. Comme évoqué plus haut, il semblerait que ces derniers indicateurs ne soient pas adaptés aux tâches de conduite pour lesquelles il est difficile de différencier la charge cognitive de la charge visuelle (Marquart, Cabrall, De Winter, 2015). La répartition spatiale du regard des conducteurs (en conditions réelles et simulées) suggère que l'attention était « flottante » pendant les périodes de conduite très monotones et avec une faible charge de travail. Nous avons proposé que les conducteurs puissent être touchés par le phénomène de vagabondage de la pensée (Helton & Russell, 2012). En cas d'erreurs d'inattention du conducteur, des boucles de rattrapage technique (par exemple, le système de freinage automatique du train) permettent de garantir la sécurité de la circulation. Cependant, Les conséquences du déclenchement de tels systèmes (arrêt d'urgence du train) perturbent la circulation ferroviaire et peuvent nuire au confort du conducteur et des voyageurs (retards). Les résultats de l'étude démontrent la nécessité d'approfondir les travaux visant à trouver des parades pour artificiellement augmenter la charge cognitive des opérateurs en cas de conditions de conduite monotones ou à concevoir de nouvelles interfaces homme-machine permettant de réengager un opérateur rapidement (par exemple, l'ajout d'un assistant cognitif au cockpit). A plus court terme, nos résultats pourront être utilisés pour construire des jeux de données qui permettront d'illustrer les propos des formateurs afin de sensibiliser les conducteurs novices sur ces aspects.

BIBLIOGRAPHIE

- Edkins, G.D. & Pollock, C.M. (1997). The influence of sustained attention on railway accident. *Accident Analysis & Prevention*, 29(4), 533-539.
- Gabon, P.H., Coblenz, A., Mollard, R. & Fouillot, J.P. (1993). Human vigilance in railway and long-haul flight operation. *Ergonomics*, 36(9), 1019-1033.
- Helton, W.S & Russell, P.N (2012). Brief mental breaks and content-free cues may not keep you focused. *Experimental Brain Research*, 219(1), 37-46.
- Horiguchi, Y., Suzuki, T., Sawaragi, T., Nakanishi, H. & Takimoto, T. (2016). Extracting Train Driver's Eye-Gaze Patterns Using Graph Clustering. *Science Direct*, 49(19), 621-626.
- Langner, R. & Eickhoff, S.B. (2013). Sustaining attention to simple tasks : A meta-analytic review of the neural mechanisms of vigilant attention. *Psychological bulletin*, 139(4), 870-900.
- Marquart, G., Cabrall, C, De Winter, J. (2015). Review of eye-related measures of drivers' mental workload. *Procedia Manufacturing*, 3, 854-2861.
- Martin, C. (2013). *La gestion de la charge mentale des contrôleurs aériens en route : apports de l'eye-tracking dans le cadre du projet européen SESAR*. Thèse de doctorat, Université Toulouse le Mirail Toulouse II, <tel-00921212>.
- Matthews, G. & Desmond, P.A. (2002). Task-induced fatigue states and simulated driving performance. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology* 55A, (2), 659-686.
- Merat, N., Mills, A., Bradshaw, M., Everatt, J., & Groeger, J. (2002). *Allocation of attention among train drivers*. In P.T. McCabe (Ed.), *Contemporary Ergonomics*. London: Taylor and Francis.
- Naweed, A. (2014), Investigations into the skills of modern and traditional train driving. *Applied ergonomics*, 45(3), 462-470.
- Parasuraman R., Warm J.S., Dember W.N. (1987) *Vigilance: Taxonomy And Utility*. In: Mark L.S., Warm J.S., Huston R.L. (eds) *Ergonomics and Human Factors. Recent Research in Psychology*. New York : Springer.
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction : an approach to cognitive engineering*. New-York : North-Holland.
- Süssman, D., Coplen, M. (2000). Fatigue and Alertness in the United States Railroad Industry, Part I : The Nature of the Problem. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 3(4), 211-220.
- Szulewski, A., Roth, N. & Howes, D. (2015). The use of task-evoked pupillary response as an objective measure of cognitive load in novices and trained physicians : a new tool for the assessment of expertise. *Academic Medicine*, 90(7), 981-987
- Wiener, E.L., Curry, R.E. & Faustina, M.L. (1984). Vigilance and taskload : in search of the inverted U., *Human Factors*, 26, 215-22.