



HAL
open science

Impact d'un sommet de côte et de ses aménagements sur le comportement et la réactivité cardiaque d'un conducteur à l'approche

Janick Naveteur, Jean Michel Auberlet, Julie Paxion, Florence Rosey,
Françoise Anceaux, Marie-Pierre Pacaux-Lemoine

► To cite this version:

Janick Naveteur, Jean Michel Auberlet, Julie Paxion, Florence Rosey, Françoise Anceaux, et al.. Impact d'un sommet de côte et de ses aménagements sur le comportement et la réactivité cardiaque d'un conducteur à l'approche. 8ème conférence de Psychologie Ergonomique (EPIQUE), Jul 2015, Aix en Provence, France. 12p. hal-01206186

HAL Id: hal-01206186

<https://hal.science/hal-01206186>

Submitted on 28 Sep 2015

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.

Impact d'un sommet de côte et de ses aménagements sur le comportement et la réactivité cardiaque d'un conducteur à l'approche.

Janick Naveteur (1), Jean-Michel Auberlet (2), Julie Paxion (1), Florence Rosey (3), Françoise Anceaux (1), Marie-Pierre Pacaux-Lemoine (1)

(1) Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines (LAMIH, CNRS UMR 8201) - Le Mont Houy – F-59 313 Valenciennes Cedex 09

Prenom.Nom@univ-valenciennes.fr

(2) Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) Laboratoire Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations (LEPSiS), Cité Descartes - Champs sur Marne – F-77 447 Marne la Vallée Cedex 2

jean-michel.auberlet@ifsttar.fr

(3) Cerema – Direction Territoriale Normandie Centre, ERA34, 10 chemin de la poudrière F-76121 Le Grand Quevilly

Florence.Rosey@cerema.fr

Catégorie de soumission : communication longue

RÉSUMÉ

Questionnant la pertinence d'une approche psychophysiological à l'analyse des situations, l'étude porte sur la conduite automobile. Centrée sur le franchissement de sommet de côte, elle est réalisée en simulateur, avec un parcours reproduisant le relief d'une route réelle. La fréquence cardiaque (FC) du conducteur et la vitesse du véhicule sont quantifiées sur différents secteurs du relief ; la dangerosité perçue est évaluée a posteriori. Les participants testent chacun trois types d'aménagement du sommet : sans aménagement, bandes d'alerte sonore et accotements revêtus. Les résultats montrent que, globalement, les variations inter-secteurs de la vitesse et de la FC ne sont pas en phase et leurs différences interindividuelles sont fortes. L'une décélération véhiculaire à l'approche du point haut est toutefois reliée à une accélération cardiaque du conducteur. La médiation partielle de cet effet par une évaluation de dangerosité est soutenue avec les accotements revêtus, dispositif visible de loin : le danger perçu y est proportionnel à la décélération du véhicule et à l'accélération cardiaque. L'intérêt et les limites des résultats et l'approche psychophysiological sont discutés.

MOTS-CLÉS

Conduite automobile ; vitesse, fréquence cardiaque, danger, sommet de côte.

1 INTRODUCTION

Dans les sociétés modernes, la route est un des rares environnements où l'individu s'expose encore au quotidien à des atteintes soudaines de son intégrité physique. Malgré une baisse notable du nombre d'accidents au cours de la dernière décennie, le nombre de tués par an en France avoisine toujours 3 500, et près de 27 000 blessés nécessitent une hospitalisation (ONISR, 2014). Les facteurs humains sont souvent en cause : la sécurité sur la route dépend grandement du comportement des conducteurs dans une temporalité étroite. Ce comportement résulte d'une forte intrication entre cognition et émotions et ce, dans un environnement dynamique. L'approche psychoergonomique a développé des modélisations, applicables à la conduite automobile ou développées dans ce cadre, qui reflètent cette complexité (p. ex., Bellet & Tattegrain-Veste, 1999 ; Fuller, 2005 ; Ranney, 1994). Généralement en lien avec ces modèles, les stratégies de sécurité active interrogent les processus sous-tendant le comportement des conducteurs et ce, avec une diversité d'approches. Si l'étude des ajustements au niveau stratégique s'appuie majoritairement sur des enquêtes par questionnaires ou entretiens, celles du niveau tactique ou opérationnel requièrent également un recueil d'informations plus directes, que ce soit en situation réelle de conduite ou en simulateur. Ainsi, par exemple, des informations factuelles sur la vitesse ou le positionnement latéral des véhicules peuvent être collectées et sont parfois confrontées à des informations subjectives concernant ces paramètres ou, de façon plus globale, avec le risque perçu par le conducteur (p. ex., Lewis-Evans & Charlton, 2006).

Lorsque les conducteurs sont questionnés sur leur comportement ou sur leurs ressentis, les outils psychométriques même les plus affinés méthodologiquement, n'excluent pas totalement différents biais de réponses, en particulier les biais de désirabilité sociale qui reflètent une tendance de l'individu à donner une bonne image de lui-même de façon plus ou moins consciencisée (Lajunen, Corry, Summala, & Hartley, 1997; Lajunen & Summala, 2003). De plus, les questionnements *a posteriori* peuvent apporter des réponses peu fiables s'ils portent sur des actions insuffisamment mémorisées (Engelkamp, 1998), comme ce peut être le cas pour certaines actions automatisées de conduite. Des actions peuvent aussi avoir fait l'objet de distorsions mnésiques, notamment suite à la structuration d'un récit visant à donner sens aux perceptions (Naveteur, Pacaux-Lemoine, Morvan, Robache, Garnier, & Anceaux, 2009 ; Villame, 2004). De telles distorsions peuvent certes influencer le comportement ultérieur du conducteur, mais elles obscurcissent l'explication du comportement initialement ciblé. Enfin, tout recueil psychométrique impliquant une forme de communication directe (verbalisation, appuis sur des boutons...) en situation constitue une tâche secondaire susceptible d'interférer avec la tâche de conduite. Face à ces limites, l'approche psychophysiological appliquée suscite un intérêt grandissant dans le contexte de la sécurité routière, tout comme dans d'autres contextes d'activité. Si cette orientation n'est pas récente, comme en témoigne, dans la revue « Le Travail Humain », une des premières publications concernant un véhicule instrumenté (Michaut, Pottier, Roche, & Wisner, 1964), les dispositifs d'enregistrement actuellement commercialisés sont plus conviviaux tant en ce qui concerne l'acquisition que l'analyse des signaux. De fait, ils séduisent un nombre croissant de chercheurs espérant recueillir des informations objectives et des démonstrations indiscutables. La Psychoergonomie s'ouvre donc de plus en plus à la Psychophysiology, discipline étudiant les liens existant entre activité physiologique et processus psychologiques chez l'être humain (Coles, 2003). Ces liens sont toutefois plus hypothétiques et complexes que ne le suggère une conception paralléliste, héritée de Leibniz (cf. Garber, 1983). Proposant une taxonomie des relations psychophysiological, Cacioppo, Tassinari et Berntson (2007) distinguent trois dimensions : la sensibilité qui peut être faible ou forte selon la proportionnalité de la taille des variations observées dans chaque dimension, la spécificité allant de « *one-to-one* » à « *one-to-many* » si un élément dans l'une des dimensions (physiologique ou psychologique) n'est relié qu'à un seul élément (parallélisme) ou à plusieurs éléments dans l'autre dimension, et la généralité, à savoir la plus ou moins grande dépendance de la relation par rapport au contexte. Il est patent que la probabilité d'une relation « idéale », soit une « *one-to-one* » très

sensible et indépendante du contexte, est assez faible. En conséquence, une grande prudence d'interprétation est requise, même avec les indices les plus classiques tels les paramètres cardiovasculaires.

Le cœur est l'élément central du système cardiovasculaire. Son fonctionnement, régulé par le système nerveux végétatif, ne peut être modifiée volontairement de façon directe. La fréquence cardiaque (FC) est augmentée par l'adrénaline sous l'influence du système nerveux sympathique qui prépare l'organisme à une réaction d'attaque ou de fuite ; elle est ralentie par l'acétylcholine sous l'influence du système nerveux parasympathique qui vise à restaurer le fonctionnement initial. Des facteurs divers affectent le rythme cardiaque de façon phasique, de façon plus ou moins saillante. Les interprétations de telles accélérations ou décélérations sont multiples. Ainsi, des variations de FC sont classiquement considérées comme une composante de certaines émotions (pour une revue, voir Levenson, 2014). En lien ou non avec les émotions, le fait que la fréquence cardiaque dépende de mécanismes nerveux qui contrôlent le mouvement est aussi une caractéristique notable (Obrist, 1976) dans un contexte d'activité à composante motrice comme l'est la conduite automobile.

La fréquence cardiaque (FC) est très souvent prise en compte en conduite automobile, soit seule, soit en association avec d'autres indices psychophysologiques. L'objectif fréquemment mis en avant est de pouvoir intégrer dans l'interfaçage Humain-Machine des informations concernant l'état du conducteur en termes de stress, de charge mentale ou de fatigue (ex. Healey & Picard, 2000 ; Nasoz, Lisetti, & Vasilakos, 2010). Des variations phasiques de FC ont été mises en relation avec des typologies et l'état des conducteurs, les véhicules ou le trajet (durée, trafic, conditions climatiques) (p. ex., Fairclough & Spiridon, 2012 ; Malta, Blanchard, Freidenberg, Galovski, Karl, & Holzapfel, 2001 ; Schmidt, Schrauf, Simon, Fritzsche, Buchner, & Kincses, 2009 ; Vivoli, Bergomi, Rovesti, Carrozzini, & Vezzosi, 1993 ; Zhao, Zhao, Liu, & Zheng, 2012). Les travaux centrés sur l'infrastructure routière sont plus rares. Parmi ceux-ci, Helander (1975) ne constate pas de variation significative de la FC au niveau d'un dos d'âne dont le franchissement n'impose aucune manœuvre particulière. En revanche, une accélération cardiaque d'en moyenne 10 bat/mn a été observée dans des giratoires (Heyes, Armstrong, & Willans, 1976) ; elle commence juste avant l'entrée et se termine rapidement après la sortie mais elle est grandement liée au trafic, étant totalement absente si aucune autre voiture n'est engagée sur le giratoire. Backs, Lenneman, Wetzell et Greene (2003) constatent également une accélération cardiaque dans des virages, une décélération survenant toutefois pour un virage très serré en lien avec l'augmentation du flux d'informations visuelles. À notre connaissance, aucune donnée psychophysologique n'est disponible pour des sommets de côte, alors qu'il s'agit d'une configuration particulière dans le sens où elle génère une incertitude sur les éléments d'infrastructure ou de trafic subséquents au point haut. Statistiquement toutefois, les sommets de côte ne constituent pas un sur risque, sauf si le point haut dissimule un virage ou un carrefour (Rosey, 2007). Par ailleurs, un lien entre la FC et la vitesse véhiculaire a été recherché, avec des résultats contrastés (Hoffman, 1961 ; Tejero & Chóliz, 2002 ; Suenaga, Goto, Torigoe, Yamashita, & Hattori, 1965) ; le milieu urbain favoriserait l'émergence d'une relation positive probablement liée à un accroissement conjoint des accélérations-décélérations et des dangers perçus (Min, Chung, Park, Kim, Sim, & Sakamoto, 2002) ; en d'autres termes, les processus sous-jacents seraient à la fois le couplage cardio-somatique et la peur. La difficulté à relier FC et vitesse n'est pas surprenante car la vitesse est un paramètre multidéterminé (Horberry, Hartley, Gobetti, Walker, Johnson, Gersbach, & Ludlow, 2004) ; son incidence sur la probabilité d'accidents (Aarts & Van Schagen, 2006) justifierait toutefois de nouvelles approches psychophysologiques dans des conditions routières bien ciblées afin d'optimiser la connaissance des processus émotionnels sous-jacents.

Réalisée en simulateur, la présente étude porte sur le franchissement de sommet de côte. Le recueil de données exploitées ici concerne la vitesse du véhicule et la fréquence cardiaque du conducteur, tous deux quantifiés sur différents secteurs de la section routière afin de permettre l'étude dynamique de leurs variations en fonction du relief. Une décélération du véhicule est

attendue dans les secteurs critiques (Fambro et al., 2000) et l'appui sur la pédale de l'accélérateur est quantifié pour en préciser l'origine. Il est également fait l'hypothèse de l'occurrence d'une accélération cardiaque reliée à la perception du danger, quantifiée *a posteriori* en lien avec le franchissement du sommet. Des covariations possibles seront recherchées entre la vitesse et la fréquence cardiaque. Compte tenu de la nature de ces paramètres, des fortes différences interindividuelles sont attendues. En conséquence, l'étude est centrée sur les ajustements (variations par rapport à un secteur de référence) autant que sur les valeurs brutes. En outre, sont comparés trois types d'aménagement d'un même sommet, dont l'impact était initialement testé sur les positions latérales (Auberlet et al., 2012) ; l'intérêt se focalise ici sur des accotements revêtus, considérant, dans cette étude, qu'ils produisent un visuel plus saillant susceptible de favoriser des ajustements anticipés liés à la perception d'un danger et, notamment, une relation inverse entre vitesse et fréquence cardiaque.

2 METHODE

2.1. Participants

Trente-six participants (12 femmes et 24 hommes), âgés de 18 à 55 ans ($M = 29.19 \pm 10.28$) ont participé à l'étude. Tous étaient titulaires d'un permis de conduire B de plein droit (aucun conducteur sous restrictions) ; en moyenne, ils disposaient d'une expérience de conduite de 11 ans \pm 9,8 ans et parcouraient 17 604 km/an \pm 9 363 km. Tous avaient une vision normale ou corrigée. Ils ont été contactés par diffusion d'un appel à recrutement dans différents réseaux en lien avec le laboratoire et aucun volontaire n'avait antérieurement conduit dans le simulateur.

2.2. Matériel

L'étude a été menée sur le simulateur dynamique à plateforme mobile SHERPA (Simulateur Hybride d'Etude et de Recherche de PSA Peugeot Citroën pour l'Automobile ; Figure 1) de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. Dans la configuration utilisée pour l'expérimentation, SHERPA se présente sous la forme d'un véhicule Peugeot 206 fixé sur une plateforme mobile à six axes, le tout positionné face à trois écrans plats assurant un champ visuel de 180° ; l'écran central est positionné à 3,3 m devant le conducteur et les écrans périphériques forment avec lui un angle de 60°. L'image projetée couvre au total un angle de 180° à l'horizontale et 45° à la verticale du point de vue du conducteur, avec une résolution de 1280×1024 pixels. Les rétroviseurs intègrent des écrans LCD couleur, avec une résolution de 800×480 pixels et une vitesse de rafraîchissement de 60 Hz. Le tableau de bord est conforme à celui d'un véhicule standard, indiquant notamment la vitesse du véhicule. Un retour sonore est fourni quand le véhicule franchit les bandes rugueuses et une vibration est générée par la plateforme mobile.



Figure 1. Le simulateur de conduite SHERPA

Dans cette étude, le parcours était une section expérimentale rectiligne de 3 km de long, correspondant à une portion de route bidirectionnelle de type départementale d'une largeur de 6 m, basée sur une configuration topographique réelle (D961, dans le Maine-et-Loire). Les largeurs de voie, marquages au sol, distances perçues et autres caractéristiques géométriques étaient incorporés de sorte que la perception de la simulation corresponde à celle de la route réelle. La section reproduite incluait un relief en deux côtes successives. Bien que moins haut, le premier sommet de côte (SdC) masquait le second aux conducteurs à l'approche. À des fins d'analyse, cinq secteurs (S) routiers de 150 m chacun sont définis par rapport au relief (Figure 2) :

- S1, section de référence sans aménagement se terminant avant le point haut du premier SdC,
- S2, section au bas du second SdC d'où le point haut est visible,
- S3, partie avant le point haut du second SdC,
- S4, partie après le point haut
- S5, fin de la descente.

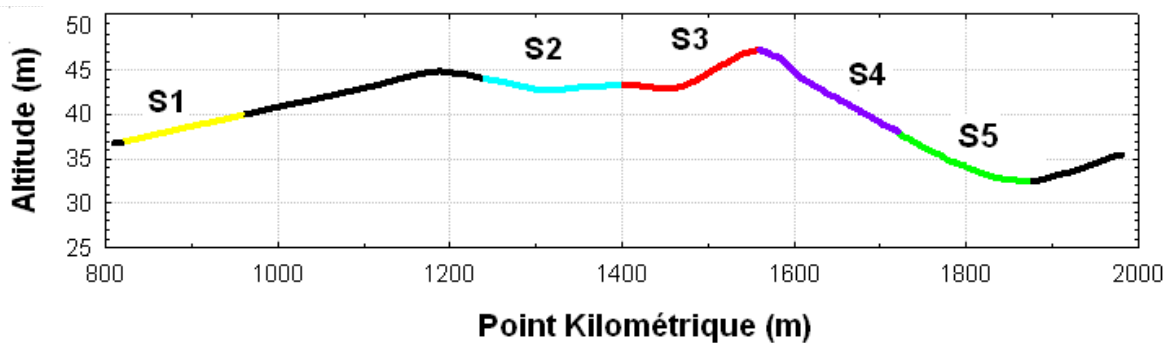


Figure 2. Reliefs de la portion de route expérimentale analysée sur 5 secteurs (S1 à S5)

Comme le montre la figure 3, trois types d'aménagements étaient testés sur le second sommet côte. Ils couvraient 150 m avant et après le sommet, soit les secteurs 3 et 4 tels que définis ci-avant. Les trois aménagements étaient : 1) condition contrôle sans aménagement, 2) bandes d'alerte sonore de type creusé chaque côté de la ligne centrale, et 3) accotements revêtus de couleur ocre.



Figure 3. Caractéristiques visuelles du second sommet de côte ; de gauche à droite : référence sans aménagement, bandes d'alerte sonore, accotement revêtu.

Un trafic léger circulait en sens inverse. Comme sur la route réelle, la vitesse était limitée à 90 km/h sur la section expérimentale. Aucun panneau de prescription de vitesse n'était implanté sur la base 3D afin de ne pas influencer les participants. La règle des 90 km/h était juste rappelée verbalement dans les consignes. La vitesse réelle du véhicule était échantillonnée à 60 Hz, tout comme les appuis sur la pédale d'accélérateur. L'activité électrocardiographique du conducteur était enregistrée à l'aide d'un dispositif BIOPAC MP 150, avec une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz. Les électrodes d'enregistrement à usage unique étaient placées en dérivation DII d'Eithoven, soit une mesure bipolaire sur le poignet droit et la cheville gauche.

2.3. Procédure

À leur arrivée dans le laboratoire, les participants lisaient et signaient un formulaire de consentement éclairé et complétaient un bref questionnaire démographique avant de se familiariser avec la conduite en simulateur durant 20 min sur une section routière différente de la section expérimentale. Ils étaient ensuite informés qu'ils devraient conduire, comme ils le feraient dans la réalité, sur une route rurale où quelques perturbations pourraient apparaître. Les participants effectuaient trois passages sur le relief, un pour chaque type d'aménagement. L'ordre des conditions était contrebalancé entre les participants. À l'issue de chaque trajet, les participants répondaient à la question « *Le sommet de côte vous a-t-il semblé dangereux ?* ». Pour ce faire, ils entouraient un chiffre sur une échelle numérique graduée de 1 à 7, bornée à gauche par « *Pas du tout* » et à droite par « *Tout à fait* ». En fin de session, les participants étaient informés des objectifs de l'étude et invités à commenter librement l'expérience. Une session expérimentale durait en moyenne 1h45.

2.4. Analyse des données

Pour chaque franchissement de la portion de relief, la vitesse moyenne du véhicule a été calculée sur les 5 secteurs. Après exploration visuelle du signal ECG et élimination *a posteriori* des artéfacts, la fréquence cardiaque (FC) moyenne a été calculée sur les 5 secteurs. Les paramètres retenus pour l'analyse (vitesse, FC, et danger perçu) ont été recueillis dans les trois conditions d'aménagement. Un test de Kolmogorov-Smirnov confirme une normalité des distributions pour les vitesses et la fréquence cardiaque autorisant des analyses de variance (ANOVA) paramétrique selon un plan intra-sujets 5 (secteurs) x 3 (aménagements), suivies de comparaisons *post-hoc* effectuées au moyen du test de Newman-Keuls. Concernant le danger perçu, les conditions requises pour des analyses paramétriques ne sont pas remplies ; l'effet de du type d'aménagement a été testé par ANOVA de Friedman. Pour apprécier les liens entre les variables dépendantes absolues et relatives (essentiellement écarts entre le secteur de référence et les autres secteurs), des coefficients de corrélations de Bravais-Pearson ou de Spearman ont été calculés selon le type de données.

3 RESULTATS

3.1. Vitesse du véhicule

L'ANOVA révèle un effet significatif du secteur ($F(4/140) = 52,17$; $\epsilon = 0,52$; $p < .001$; $\eta^2_p = 0.60$; Figure 4). Relativement à la vitesse constatée sur le secteur de référence, le profil est celui d'une décélération progressive suivie d'une accélération en fin de descente du second sommet (S1 : $M = 89,1 \text{ km/h} \pm 9,6$; S2 : $M = 84,0 \text{ km/h} \pm 10,3$; S3 : $M = 80,9 \text{ km/h} \pm 11,5$; S4 : $M = 76,4 \text{ km/h} \pm 12,7$; S5 : $M = 83,6 \pm 10,3$) ; les comparaisons *post-hoc* indiquent en effet que les différences de vitesse entre les secteurs sont significatives (tous les $p < .001$), exceptée celle entre S2 et S5 ($p = .72$). Même si les vitesses sur les différents secteurs sont significativement corrélées entre elles ($r(36) \geq 0,78$), la vitesse enregistrée sur le secteur de référence ne prédit pas les variations de vitesse constatées ultérieurement ($r(36) \leq 0,18$) suggérant de grandes différences interindividuelles dans l'ajustement des vitesses au relief. L'ANOVA montre également que l'effet simple de l'aménagement et l'interaction entre l'aménagement et le secteur ne sont pas significatifs (respectivement, $F(2/70) = 0,00$, $p = .37$ et $F(8/280) = 0,35$, $p = .94$). Les variations de vitesse en fonction du secteur ne sont pas la simple conséquence du dénivelé : intervient également une modulation active de l'enfoncement de la pédale d'accélérateur par le conducteur, comme le révèle le seul résultat significatif de l'ANOVA sur ce paramètre ($F(4/140) = 33,45$; $\epsilon = 0,72$; $p < .001$; $\eta^2_p = 0.48$) ; le profil décrit une remontée progressive de la pédale entre les secteurs 1 et 3 puis un enfoncement en secteur 4 (S1 : $M = 26,1 \pm 3,7$; S2 : $M = 22,5 \pm 4,2$; S3 : $M = 17,1 \pm 6,3$; S4 : $M = 24,4 \pm 4,2$. S5 : $M = 26,5 \pm 5,5$; S2 et S3 diffèrent significativement l'un par rapport à l'autre et par rapport aux des autres secteurs (tous les $p < .001$) qui ne diffèrent pas entre eux (tous les $p > .45$).

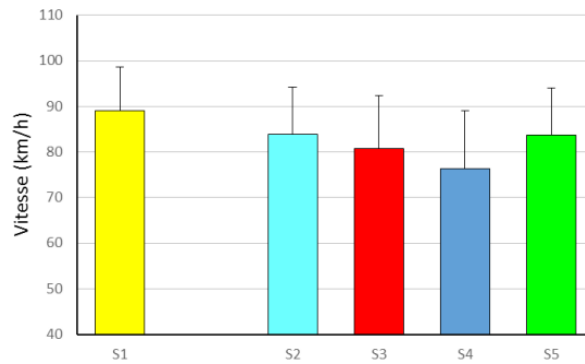


Figure 4. Vitesse moyenne sur les 5 secteurs expérimentaux.

3.2. Fréquence cardiaque du conducteur

L'ANOVA révèle un effet significatif du secteur ($F(4/140) = 3,63$; $\epsilon = 0,79$; $p = 0,013$; $\eta^2_p = 0,09$; Figure 5). Les comparaisons post-hoc indiquent que cet effet principal résulte essentiellement de la survenue d'une accélération cardiaque en fin de descente du second SdC : la FC sur S5 ($M = 78,2$ bat/min $\pm 16,5$) est significativement plus élevée (tous les $p < .05$) que sur les autres secteurs (S1 : $M = 76,5$ bat/min $\pm 17,5$; S2 : $M = 77,1$ bat/min $\pm 15,9$; S3 : $M = 76,7$ bat/min $\pm 16,3$; S4 : $M = 76,5$ bat/min $\pm 16,1$) qui ne diffèrent pas entre eux (tous les $p > .45$). Les FC moyennes sur les différents secteurs sont significativement corrélées entre elles ($r(36) \geq .97$), signe d'une rythmicité tonique propre à chaque conducteur sur le tronçon. Les différences inter-secteurs présentent toutefois une forte variabilité interindividuelle (p. ex., les différences individuelles entre S5 et les autres secteurs, vont d'une accélération de +12 bat/min à une décélération de -8,8 de bat/min). La FC enregistrée sur le secteur de référence ne prédit pas les variations de fréquence cardiaque constatées dans les autres secteurs ($|r(36)| < 0,13$). L'ANOVA montre en outre que l'effet simple de l'aménagement et l'interaction entre l'aménagement et le secteur ne sont pas significatifs (respectivement, $F(2/70) = 1,87$, $p = .16$ et $F(8/280) = 0,92$, $p = .50$).

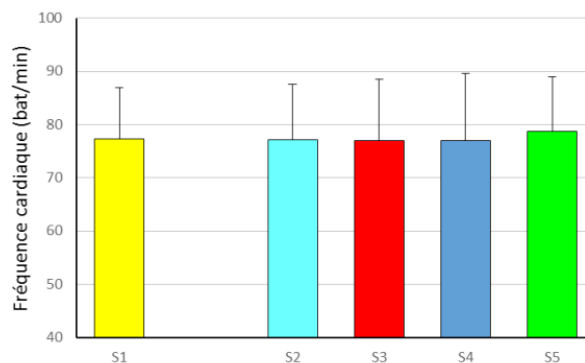


Figure 5. Fréquence cardiaque moyenne sur les 5 secteurs expérimentaux.

3.3. Relation entre vitesse et fréquence cardiaque

Sur chacun des secteurs, les valeurs moyennes de vitesse ne sont pas significativement corrélées avec les valeurs moyennes de fréquence cardiaque ($|r(36)| < 0,26$). Comme rapportée ci-avant, la présence de fortes différences interindividuelles, tant dans les variations de vitesse que dans les variations du rythme cardiaque, motive l'analyse corrélacionnelle de ces variations. Les résultats concernant les accélérations-décélérations par rapport au secteur de référence révèlent ainsi une corrélation négative entre, d'une part, la différence de vitesse entre S1 et S3 ou S4 (soit l'importance de la décélération du véhicule) et, d'autre part, la différence de fréquence cardiaque entre ces secteurs : S1-S3 : $r(36) = -0,43$, $p < .01$; S1-S4 : $r(36) = -0,47$, $p < .01$ (pour information, S1-

S2 : $r(36) = -0,29$, $p < .10$ et S1-S5 : $r(36) = 0,09$, ns). Comme le montre la figure 6, les conducteurs qui n'ont pas présenté d'accélération cardiaque (possiblement ceux qui n'ont pas envisagé l'occurrence possible d'un danger) n'ont pas ou réduit leur vitesse à l'approche du point haut. Pour terminer, compte tenu de la cooccurrence d'une accélération de vitesse et d'une accélération cardiaque sur le dernier secteur, une corrélation entre les différences S4-S5 pour ces deux paramètres a été recherchée *a posteriori*, supposant une influence causale directe ou non de la vitesse, mais elle n'atteint pas le seuil de signification ($r(36) = 0,32$, $p < .10$).

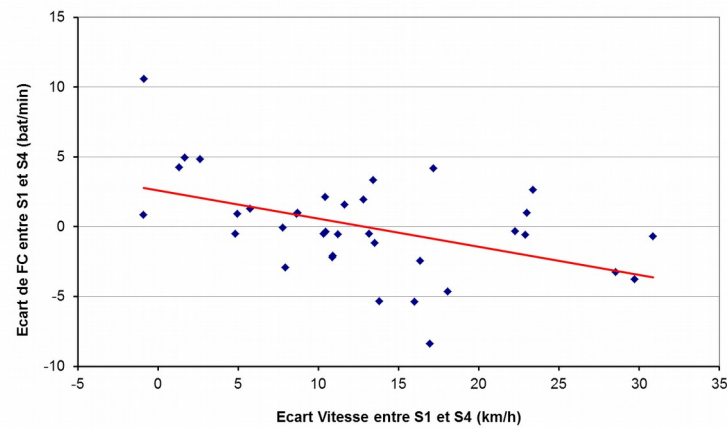


Figure 6. Corrélation entre écart de vitesse et écart de fréquence cardiaque (FC) entre la référence et le secteur consécutif au sommet.

3.4. Danger perçu par les conducteurs

Le lien décrit ci-avant entre décélération véhiculaire et accélération cardiaque est possiblement médié par la perception d'un danger potentiel lié au relief. Pour conforter cette hypothèse, se justifient des traitements corrélationnels entre ces paramètres (précisément les différences avec le secteur de référence pour la vitesse et la FC) et le score de dangerosité perçue ($M = 4,6/10 \pm 1,49$; empan : 1-7/10). Il est attendu que ce score soit associé à une décélération du véhicule et à une accélération cardiaque. Un pattern en ce sens apparaît lorsque le sommet est aménagé avec un accotement revêtu. Le tableau 1 détaille ces résultats : davantage de danger est perçu par ceux dont la décélération véhiculaire et/ou l'accélération cardiaque ont été plus fortes, notamment sur les secteurs 3 et 4. L'hypothèse est donc partiellement confortée mais un seul aménagement produit l'effet, celui dont le visuel est plus saillant, alors même que l'ANOVA de Friedman ne montre pas d'effet significatif global du type d'aménagement sur le danger perçu (ANOVA du $\chi^2(36/2) = 0,08$, $p = .96$). A noter également, sur le secteur 3, soit juste avant le point haut, un lien inverse entre le danger perçu et l'enfoncement de la pédale d'accélérateur ($\rho(36) = -.36$, $p < .05$), l'effet étant retrouvé avec les bandes d'alerte sonore ($\rho(36) = -.34$, $p < .05$) et l'accotement revêtu ($\rho(36) = -.38$) mais pas dans la condition de référence ($\rho(36) = -.20$, ns).

	Vitesse	Fréquence cardiaque
S1 - S2	.39 *	-.32
S1 - S3	.40 *	-.43 *
S1 - S4	.53 *	-.33 *
S1 - S5	.46 *	-.21

Tableau 1. Corrélations (coefficient rho de Spearman) entre danger perçu et écart entre la référence (S1) et les autres secteurs (S2 à S5) pour la vitesse et la fréquence cardiaque (* $p < .05$), le sommet étant aménagé avec des accotement revêtus.

4. DISCUSSION

Comme attendu, le relief a influencé la vitesse, induisant une décélération à l'approche de la montée et durant celle-ci, décélération qui se poursuit après le sommet ; à la fin de la descente, le véhicule accélère sans encore récupérer sa vitesse de référence. Les vitesses sur les différents secteurs sont corrélées, reflétant possiblement un style de conduite (Haglund & Åberg, 2002). Considérées comme des réponses phasiques, les variations de vitesse en fonction du relief seraient toutefois dissociées de cette typologie globale. Elles sont potentiellement interprétables en termes d'ajustement opérationnel (Michon, 1985) et seraient motivées par la prudence bien que ne s'exerçant pas en référence à une vitesse objective. Une modulation de l'enfoncement de la pédale d'accélérateur conforte l'idée d'un ajustement intentionnel de la vitesse, notamment un lever-le-pied à l'approche du point haut. L'enfoncement de cette pédale révèle en outre une intention d'accélérer effective juste après le sommet, soit probablement dès que sont levées les incertitudes relatives à configuration subséquente, même si la vitesse du véhicule reste réduite sur ce secteur.

La fréquence cardiaque varie significativement en fonction du relief mais l'importance de l'effet est notablement moindre que celui obtenu pour la vitesse. Globalement, il s'agit surtout d'une accélération en fin de descente, dont l'explication peut difficilement être précisée en l'état actuel : il est possible qu'elle soit la conséquence de l'augmentation de vitesse sur le secteur (Min et al., 2002), même si une proportionnalité n'est pas clairement soutenue statistiquement. Plus important en termes de sécurité est le fait que, comparant le secteur de référence aux secteurs situés juste avant ou après le point haut (là où la réduction de vitesse est importante par rapport à la référence), un lien émerge entre accélération cardiaque et décélération véhiculaire. Une explication simple en termes de couplage cardio-somatique (Obrist, 1976) doit être envisagée, reflétant une augmentation de la demande métabolique périphérique causée par l'actionnement de la pédale d'accélérateur, soit surtout le lever-le-pied maximal avant le point haut. Cependant, la médiation de ce lien avec le danger perçu dans le cas d'un aménagement du relief avec accotement revêtu interpelle. Sans pour autant impacter globalement la vitesse, la FC ou le danger perçu, cet aménagement met visuellement en évidence la particularité du relief et ce, d'une façon peu usuelle. Il envoie donc un signal plus saillant auquel le conducteur peut répondre de façon anticipée avec un contrôle cognitif fondé sur des savoir-faire (ou automatismes ; Rasmussen, 1987 ; Hoc & Amalberti, 2007) ou contrôle opérationnel (Van der Molen & Bötticher, 1988). Rien d'étonnant alors à ce que l'ampleur de l'ajustement de vitesse et des variations de fréquence cardiaque soit reliée au danger perçu. Le caractère corrélationnel de l'effet traduit toutefois une variabilité interindividuelle de l'issue du processus d'évaluation de la dangerosité (cf. Lazarus, 1991). En termes de causalité, si la décélération véhiculaire est probablement la conséquence de la perception d'un danger, le lien entre danger perçu et fréquence cardiaque serait plus complexe. En effet, l'accélération cardiaque peut être une composante physiologique d'une réaction de peur issue du processus initial d'évaluation du danger (Levenson, 2014) mais, sachant que le score de danger est recueilli *a posteriori*, il n'est pas exclu que le ressenti intéroceptif de l'accélération cardiaque ait majoré le ressenti de dangerosité (Niedenthal, 2007).

En conclusion, cette étude en simulateur décrit des variations de vitesse et de fréquence cardiaque en lien avec le franchissement d'un sommet de côte portant trois types d'aménagements différents. Les résultats obtenus avec les procédures statistiques classiques concernent surtout des différences liées au relief et portent essentiellement sur la vitesse. Elles sont explicables en référence à l'incertitude concernant les événements de route subséquents au point haut, incertitude que les aménagements ne peuvent lever d'où probablement leur absence d'incidence globale. Avec ce type d'analyse, la psychophysologie est quasi muette, le protocole n'incluant pas de situations ou de stimulations susceptibles d'induire systématiquement une réaction émotionnelle notable. La

variabilité interindividuelle des réactions suggère toutefois que certains conducteurs seraient plus réactifs que d'autres à une telle configuration de route. Une analyse corrélacionnelle fine fait ainsi apparaître des liens entre la fréquence cardiaque et le comportement de conduite, en partie médiés par l'issue d'un processus d'évaluation de la dangerosité. L'individualisation de l'approche montre sa complémentarité avec des stratégies d'étude ergonomiques, notamment la confrontation aux traces de l'activité pour faciliter un retour réflexif (cf. Cahour & Licoppe, 2010). Ceci étant, prolonger les présents résultats avec des méthodes de ce type aurait autant d'intérêt pour conforter l'interprétation des réactions physiologiques que celles-ci pourraient en avoir pour soutenir la recherche psychoergonomique. Le propos est bien ici une complémentarité et, en aucun cas les réactions physiologiques n'ont valeur de témoin indiscutable des processus psychologiques, tel suggéré par une position paralléliste. La question du lien entre émotions et mouvement (Evans, 2014) est notamment incontournable, la nuance pour la conduite automobile comme pour d'autres activités étant que les mouvements sont souvent différents de ceux permettant la fuite (ou l'attaque) dans le registre initial de notre espèce. Au total, ces liens ouvrent des pistes pour esquisser un rapprochement entre, d'une part, les modélisations de la conduite automobile et, d'autre part, les modèles cognitifs des émotions et de la cognition incarnée.

5. REMERCIEMENTS

Le projet SARI est un projet du PREDIT (Programme de Recherche, d'Expérimentation et d'Innovation dans les Transports terrestres). Nous tenons à remercier le Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer, et notamment la Direction de la Recherche, et de l'Animation Scientifique et Technique (DRAST), les Conseils Généraux des Côte d'Armor et du Maine et Loire pour leur soutien dans la réalisation de ce projet. Les auteurs remercient Jérôme Floris, le magicien du simulateur, et tous les volontaires qui ont participé à l'expérimentation.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Aarts, L., & Van Schagen, I. (2006). Driving speed and the risk of road crashes: A review. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2), 215-224.
- Auberlet, J.M., Rosey, F., Anceaux, F., Aubin, S., Briand, P., Pacaux, M.P., & Pinchault, P. (2012). The impact of perceptual treatments on driver's behavior: From driving simulator studies to field tests—First results. *Accident Analysis and Prevention*, 45, 91–98.
- Backs, R. W., Lenneman, J. K., Wetzell, J. M., & Greene, P. (2003). Cardiac measures of driver workload during simulated driving with and without visual occlusion. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 45(4), 525-538.
- Bellet, T., & Tattegrain-Veste, H. (1999). A framework for representing driving knowledge. *International journal of cognitive ergonomics*, 3(1), 37-49.
- Cacioppo, J. T., Tassinary, L. G., & Berntson, G. G. (2007). Psychophysiological science: Interdisciplinary approaches to classic questions about the mind. *Handbook of psychophysiology*, 1-16.
- Cahour, B., & Licoppe, C. (2010) [Confrontations aux traces de son activité Compréhension, développement et régulation de l'agir dans un monde de plus en plus réflexif. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 4\(2\), 243-253.](#)
- Coles, M. G. (2003). Thirty years of cognitive psychophysiology: retrospective, current state, and prospective. *Biological psychology*, 64(1), 211-216.
- Engelkamp, J. (1998). *Memory for actions*. Psychology Press/Taylor & Francis (UK).
- Evans, P. (2014). *Motivation and Emotion (PLE: Emotion)*. Psychology Press.
- Fairclough, S. H., & Spiridon, E. (2012). Cardiovascular and electrocortical markers of anger and motivation during a simulated driving task. *International Journal of Psychophysiology*, 84(2), 188-193.

- Fambro, D. B., Fitzpatrick, K., & Russell, C. W. (2000). Operating speed on crest vertical curves with limited stopping sight distance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1701(1), 25-31.
- Fuller, R. (2005). Towards a general theory of driver behaviour. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 461-472.
- Garber, D. (1983). Mind, Body and the laws of Nature in Descartes and Leibniz. *Midwest Studies in Philosophy*, 8(1), 105-133.
- Haglund M., & Åberg, L. (2002) Stability in drivers' speed choice. [Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour](#), 5(3), 177–188.
- Healey, J., & Picard, R. (2000). SmartCar: detecting driver stress. In *Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference on* (Vol. 4, pp. 218-221). IEEE.
- Helander, M. G. (1975). Physiological reactions of drivers as indicators of road traffic demand. *Transportation Research Record*, 530, 1-17.
- Heyes, A. D., Armstrong, J. D., & Willans, P. R. (1976). A comparison of heart rates during blind mobility and car driving. *Ergonomics*, 19(4), 489-497.
- Hoc, J.-M. & Amalberti, R. (2007). Cognitive control dynamics for reaching a satisficing performance in complex dynamic situations. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 1, 22-55.
- Hoffmann, H. (1961). Experimentelle Kreislaufuntersuchungen bei gesunden Kraftfahrzeugführern unter variierten Fahrbedingungen. *Munchener Medizinische Wochenschrift*, 103(47), 2335-2389.
- Horberry, T., Hartley, L., Gobetti, K., Walker, F., Johnson, B., Gersbach, S., & Ludlow, J. (2004). Speed choice by drivers: The issue of driving too slowly. *Ergonomics*, 47(14), 1561-1570.
- Lajunen, T., Corry, A., Summala, H., & Hartley, L. (1997). Impression management and self-deception in traffic behaviour inventories. *Personality and Individual Differences*, 22, 341-353.
- Lajunen, T., & Summala, H. (2003). Can we trust self-reports of driving? Effects of impression management on driver behaviour questionnaire responses. *Transportation Research Part F*, 6, 97-107.
- Lazarus, R. (1991). *Emotion and adaptation*. New York : Oxford University Press.
- Levenson, R. W. (2014). The autonomic nervous system and emotion. *Emotion Review*, 6(2), 100-112.
- Lewis-Evans, B., & Charlton, S. G. (2006). Explicit and implicit processes in behavioural adaptation to road width. *Accident Analysis & Prevention*, 38(3), 610-617.
- Malta, L. S., Blanchard, E. B., Freidenberg, B. M., Galovski, T. E., Karl, A., & Holzapfel, S. R. (2001). Psychophysiological reactivity of aggressive drivers: An exploratory study. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 26(2), 95-116.
- Michaut, G., Pottier, M., Roche, M., & Wisner, A. (1964). Etude psychophysologique de la conduite automobile : Revue générale et expériences sur circuit fermé. *Le Travail Humain*, 193-219.
- Michon, J. A. (1985). A critical view of driver behavior models : what do we know, what should we do? In L. Evans, & R. C. Schwing (Eds). *Human behavior and traffic safety*. New York: Plenum Press, 485-520.
- Min, B. C., Chung, S. C., Park, S. J., Kim, C. J., Sim, M. K., & Sakamoto, K. (2002). Autonomic responses of young passengers contingent to the speed and driving mode of a vehicle. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29(4), 187-198.
- Naveteur J., Pacaux-Lemoine M.-P., Morvan H., Robache F., Garnier C., Anceaux F. (2009). Fiabilité des actions et réactions d'urgence relatées par des conducteurs : étude en pré-crash automobile virtuel. In B. Cahour, F. Anceaux & A. Giboin (Eds), *Actes du 5° Colloque EPIQUE* (pp. 128-135). Paris : Ecole Nationale Supérieure Télécom ParisTech.
- Nasoz, F., Lisetti, C. L., & Vasilakos, A. V. (2010). Affectively intelligent and adaptive car interfaces. *Information Sciences*, 180(20), 3817-3836.
- Niedenthal, P. M. (2007). Embodying emotion. *Science*, 316(5827), 1002-1005.

- Obrist, P. A. (1976). The cardiovascular-behavioral interaction—as it appears today. *Psychophysiology*, 13(2), 95-107.
- ONISR (2014). *La sécurité routière en France - Bilan de l'accidentalité de l'année 2013*- Pré-édition. Paris: La Documentation française.
- Ranney, T. A. (1994). Models of driving behavior: a review of their evolution. *Accident Analysis & Prevention*, 26(6), 733-750.
- Rasmussen, J. (1987). *Cognitive control and human error mechanisms*. New technology and human error. New York: Wiley.
- Rosey F. (2007). *Action 1.5 – Descripteurs de lisibilité en ligne droite*. Rapport projet SARI2006 sous thème VIZIR, INRETS-MSIS, Arcueil, France, sept.
- Schmidt, E. A., Schrauf, M., Simon, M., Fritzsche, M., Buchner, A., & Kincses, W. E. (2009). Drivers' misjudgement of vigilance state during prolonged monotonous daytime driving. *Accident Analysis & Prevention*, 41(5), 1087-1093.
- Suenaga, K., Goto, K., Torigoe, H., Yamashita, Y., & Hattori, Y. (1965). The effect on cardiac functions of the driver of speedy driving on an ordinary public road. *J. Kurume MA*, 28, 1091.
- Tejero, P., & Chóliz, M. (2002). Driving on the motorway: the effect of alternating speed on driver's activation level and mental effort. *Ergonomics*, 45(9), 605-618.
- Van der Molen, H.H., & Bötticher A.M.T. (1988). A hierarchical risk model for traffic participants. *Ergonomics*, 31(4), 537-555.
- Villame, T. (2004). Conception de systèmes d'assistance au conducteur : comment prendre en compte le caractère complexe, dynamique et situé de la conduite automobile ? Cognition située et conception de systèmes d'assistance au conducteur. *@ctivités*, 1, 146-169.
- Vivoli, G., Bergomi, M., Rovesti, S., Carrozzi, G., & Vezzosi, A. (1993). Biochemical and haemodynamic indicators of stress in truck drivers. *Ergonomics*, 36(9), 1089-1097.
- Zhao, C., Zhao, M., Liu, J., & Zheng, C. (2012). Electroencephalogram and electrocardiograph assessment of mental fatigue in a driving simulator. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 83-90.