

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Etude en simulateur d'alarmes de chantier d'autoroute dans le cadre d'un dispositif de sécurité pour agents d'exploitation

A. Minard^a, S. Coeugnet^b, A. Dommes^b, F. Vienne^b et M. Lou^c

^aGENESIS, Domaine du Petit Arbois, Bâtiment Gérard Mégie BP69, 13545 Aix-En-Provence, France

^bIFSTTAR, laboratoire LEPSIS, 25 Allée des Marronniers, 78000 Versailles, France

^cAXIMUM Produits Electroniques, 17 Avenue Roger Lapébie, 33140 Villenave D'Ornon, France
aminard@optis-world.com

Afin d'assurer la sécurité des usagers des autoroutes, du personnel d'intervention et des travailleurs sur les chantiers peuvent être déployés tandis que la circulation est maintenue. Ces interventions mettent souvent en jeu la sécurité de ces agents, et, malgré les campagnes d'information auprès des usagers, les accidents ne sont pas rares. Le projet FUI YELLOW s'inscrit dans ce cadre, dans le but de mettre au point un système permettant d'informer les agents d'un danger imminent, en cas d'anomalie dans le flux de circulation. Le processus de mise au point de ce système comporte des phases d'étude perceptive d'alarmes sonores, d'intégration dans un simulateur de chantier et intervention sur route à chaussées séparées (e.g. autoroute), et enfin de test de prototype in situ. L'étude présentée se concentre sur l'évaluation perceptive d'alarmes sonores, notamment en contexte de réalité virtuelle. Les alarmes sonores produites par une sirène du commerce ont tout d'abord été étudiées à l'aide d'un test d'écoute dans le but de comparer les différents types d'alarmes proposés et identifier ceux favorisant la perception de l'urgence. Les alarmes identifiées ont ensuite été intégrées dans un environnement de réalité virtuelle, proposant une simulation audiovisuelle de chantier. Enfin, une expérience a été réalisée dans ce simulateur, où il a été demandé à des agents participants de réaliser plusieurs tâches représentatives de la situation réelle, tandis qu'une anomalie se produisait. Différentes conditions – absence d'alarme, alarme sonore, alarme haptique – étaient déclenchées lors d'une anomalie, et le comportement des agents était observé dans chaque cas. Cette étude a permis de montrer que le déclenchement des alarmes, d'autant plus lorsque celles-ci sont de nature sonore, favorise la mise en sécurité des agents. Ces résultats semblent confirmer le bien-fondé d'un tel dispositif. La suite du projet comprend une expérimentation in situ de ce dispositif.

1 Introduction

Les agents d'exploitation et les patrouilleurs sont souvent amenés à mettre en jeu leur sécurité pour garantir celle des usagers des grands axes routiers. Les données d'accidents montrent ainsi que les 5 400 « hommes en jaune » travaillant pour les sociétés d'autoroutes françaises et les 5 000 agents des Directions Interdépartementales des Routes, intervenant tous au cœur des flux de circulation, sont une population vulnérable. Depuis 10 ans, les chiffres issus des sociétés d'autoroutes montrent que ce sont 20 personnes travaillant sur le réseau autoroutier national concédé qui ont été tuées [1] et ce, malgré diverses campagnes d'information et de sensibilisation des usagers. Des mesures visant les conducteurs automobiles ont, en effet, été proposées, avec, par exemple, la réduction de la vitesse de circulation aux abords des zones de chantier [2,3,4], la mise en place de contrôles de police [5], le développement des radars pour les contrôles de vitesse [6] et l'usage de signaux lumineux [7]. Néanmoins, nous ne pouvons que constater qu'agir uniquement sur le comportement des conducteurs automobiles n'est pas suffisant pour réduire le risque d'accident des agents de chantier, et que la conception de nouveaux dispositifs d'aide dédié à la sécurité des hommes en jaune pourrait s'avérer particulièrement efficace. Pour accroître la portée d'un tel nouveau dispositif, l'expertise de l'opérateur doit être prise en compte dans sa conception [8,9]. C'est dans ce cadre que le projet FUI YELLOW s'inscrit afin de mettre au point un dispositif améliorant la sécurité des « hommes en jaunes » dans le cadre de leur travail. Ce dispositif mobile et installé sur les flèches lumineuses de rabattement ou d'urgence a pour but de détecter automatiquement un refus ou un retard de rabattement d'un usager de la route et d'alerter les agents et opérateurs afin que ceux-ci se mettent en sécurité. Dans le cadre la mise au point de ce dispositif et d'évaluation de son efficacité, cette communication présente les travaux réalisés afin de mesurer l'urgence perçue des alarmes sonores, d'abord dans un contexte de laboratoire, puis dans le cadre d'une simulation de chantier d'autoroute avec des agents et opérateurs experts. La première partie est dédiée à l'étude en laboratoire d'alarmes produites par une sirène du commerce, en en mesurant l'urgence perçue de manière directe. La seconde partie effectue une mise en situation des signaux sonores d'alerte

dans le contexte cognitif de perception de ces signaux. La situation de chantier sur route à chaussée séparée étant une situation à risque, il a été choisi d'évaluer le prototype de manière progressive et ainsi, de débiter les essais sur simulateur, avant de passer dans la suite du projet à des tests en situation réelle. Toutefois, le protocole expérimental posait une question méthodologique, celle de reproduire au plus juste, sur simulateur, la situation de travail, en proposant aux participants d'effectuer au plus près leurs gestes quotidiens et en mobilisant de manière similaire leur attention portée sur la tâche à réaliser.

2 Expérience 1 : sélection de l'alarme sonore

De nombreuses études existent dans la littérature sur les sons d'alarmes (principalement depuis les années 80). Initialement, les travaux, plutôt d'ordre académique, ont porté sur les paramètres acoustiques qui permettent de mieux véhiculer l'urgence [10,11,12,13,14]. Ces auteurs ont notamment montré que le niveau sonore, le taux de répétition, la hauteur tonale et l'irrégularité des harmoniques favorisaient la perception de l'urgence. Par la suite, des études plus spécifiques ont tenté d'utiliser ces résultats dans différents contextes d'application pratique. Par exemple, Vaillancourt et al. [15] se sont intéressés à la problématique des alarmes de recul, et notamment des nouveaux types d'alarmes, large-bande et non-tonales, qui ont récemment émergé pour ce cas d'application.

Dans le contexte du projet YELLOW, aucune conception de système électroacoustique d'alarme n'a été envisagée, ce qui a apporté la contrainte d'utiliser un système existant du commerce (appelé communément « sirène »). La sirène sélectionnée¹ a été spécifiquement choisie pour la diversité de signaux d'alarmes inclus et car elle offrait un réglage de gain. Cette section décrit une étude psychoacoustique portée sur les sons émis par cette sirène.

2.1 Stimuli

Les signaux ont été téléchargés sur le site du constructeur. Plusieurs enregistrements ont également été

¹ Klaxon Nexus 105.

effectués à des fins de calibration de ces signaux. Afin de limiter la durée de l'expérience, il a été décidé de ne conserver que 24 sons parmi la soixantaine proposée. Cette sélection a été effectuée afin d'inclure les différents types d'alarmes inclus (5 alarmes intermittentes, 4 alarmes bitonales, 13 rampes tonales ascendantes, descendantes ou les deux, 1 cloche et 1 alarme de type indéfini), mais également en ciblant les alarmes susceptibles d'être perçues comme les plus urgentes, selon la littérature (e.g. exclusion des alarmes de rythme trop lent ou de contenu fréquentiel trop élevé). Il importe également de noter que les signaux émis par la sirène sont tous des complexes harmoniques, dont la fondamentale (référéncée dans la documentation constructeur), n'est le plus souvent pas l'harmonique la plus prononcée (très probablement à cause de la réponse électroacoustique du système).

Enfin, chacune des alarmes sélectionnées a été mixée avec 3 bruits de passages de véhicule afin de reproduire un contexte d'écoute proche de la situation réelle. Ces 3 passages correspondent à des extraits d'enregistrements effectués en bordure de route 2x2 voies, en ligne droite, avec une limitation de vitesse à 110 km/h. Ces 3 extraits correspondent à 3 passages isolés, respectivement d'un camion, d'une moto, et d'une voiture. L'instant de déclenchement de l'alarme a été fixé aux alentours du pic de niveau de chaque passage de véhicule. A titre d'exemple, la Figure 1 montre la représentation temps-fréquence d'une alarme bitonale mixée au son de passage de camion.

Le corpus sonore de l'expérience est donc composé de 72 sons au total (24 alarmes * 3 passages de véhicules).

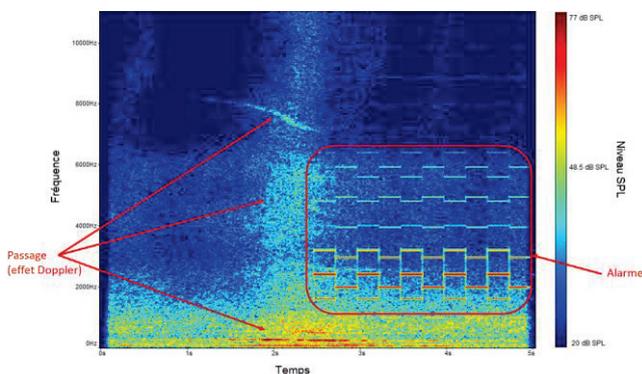


Figure 1: Représentation temps-fréquence du mixage d'une alarme bitonale et du passage de camion.

2.2 Matériel

Une carte audio RME Fireface UC et un casque audio ouvert Sennheiser HD 650 ont été utilisés pour l'expérience. Une interface graphique programmée en Matlab gérant la lecture des sons, la saisie des réponses des participants et la sauvegarde des données a également été utilisée.

2.3 Participants

Vingt-sept volontaires (11 femmes, 16 hommes), âgés entre 22 et 60 ans, ont pris part à ce test. Aucun n'a

mentionné avoir un défaut particulier d'audition dont il aurait eu connaissance.

2.4 Procédure

Avant de débiter l'expérience, une consigne écrite était fournie à chaque participant, afin de leur présenter le contexte de l'étude et la tâche à réaliser. L'expérience emploie une procédure dite d'évaluation comparée. Au cours de cette procédure, 13 sons sont présentés simultanément à l'écran. Chaque son est accompagné d'une glissière allant de 0 (« le moins urgent ») à 100 (« le plus urgent ») permettant aux participants d'évaluer directement le degré d'urgence perçue de chaque son. Les participants sont libres d'écouter et d'évaluer les sons dans l'ordre qu'ils souhaitent, et de renouveler leurs écoutes et modifier leurs 13 évaluations autant de fois qu'ils le désirent, tant qu'ils n'ont pas validé. Par ailleurs, il leur est imposé de placer au moins un des curseurs parmi les 13 à la valeur 0, et au moins un à la valeur 100.

Afin de se familiariser avec l'interface et la tâche à réaliser, les participants effectuent un premier jeu d'évaluations pour 13 sons d'entraînement (alarmes différentes des sons du test), présentées sans passage de véhicule. Les participants évaluent ensuite de la même manière plusieurs jeux successifs de 13 évaluations. Chaque jeu de 13 alarmes, lues avec le même passage de véhicule, contient 2 alarmes communes, qui servent d'ancres cachées respectivement basse et haute de l'échelle (identifiées lors de séances d'écoute préliminaires). Les 22 alarmes restantes sont réparties aléatoirement en deux groupes de 11, qui forment en y ajoutant les 2 ancres communes deux jeux de 13 alarmes, pour un passage de véhicule donné. Au total, 6 jeux de 13 alarmes sont donc successivement présentés. La répartition des 22 alarmes hors ancres est différente pour chaque passage de véhicule.

L'ordre de présentation des 6 jeux de 13 alarmes est permuté circulairement entre chaque participant pour éviter un biais lié à l'ordre de présentation. Un point particulier des instructions aux participants leur signale que ce n'est pas le passage de véhicule qui déclenche l'alarme ; l'urgence perçue qu'ils doivent évaluer est liée uniquement à l'alarme, tandis que le passage de véhicule sert de « mise en contexte ».

2.5 Résultats

Les données de sorties de l'expérience pour chaque participant prennent la forme d'un jeu de 72 évaluations de l'urgence perçue allant de 0 à 100 (24 alarmes et 3 passages de véhicules), sauf pour les ancres pour lesquelles les évaluations sont doublées.

Une analyse des résultats individuels, incluant une analyse des évaluations des ancres et une analyse hiérarchique du panel de participants fondée sur les corrélations inter-individuelles, a été effectuée. Celle-ci a abouti à l'exclusion des résultats d'un des 27 participants présentant trop de divergences avec les autres. Cette analyse a également révélé une possible décomposition du reste du panel en 2 groupes ayant des stratégies de notation différentes.

Une analyse de variance à mesures répétées et à 2 facteurs a été appliquée sur les résultats des 26 participants restants. Les 2 facteurs expérimentaux sont l'alarme émise (24 niveaux) et le passage de véhicule (3 niveaux). Celle-ci révèle des effets significatifs des 2 facteurs (respectivement $F = 44,2$; $p < 0,01$ et $F = 4,0$; $p < 0,05$) ainsi que leur interaction ($F = 1,5$; $p < 0,05$). Toutefois, les tailles d'effets sont très différentes, le facteur alarme expliquant à lui seul 53 % de la variance, tandis que le facteur passage de véhicule n'en explique que 0.2 % et l'interaction, 0.7 %. En effet, l'urgence perçue avec le passage de voiture n'est respectivement supérieure en moyenne à celles des passages de moto et de camion que de 2 et 3 points d'échelle (sur 100). Comme la Figure 2 le montre, les évaluations moyennes des différentes alarmes couvrent quant à elles la quasi-totalité de l'échelle de notation.

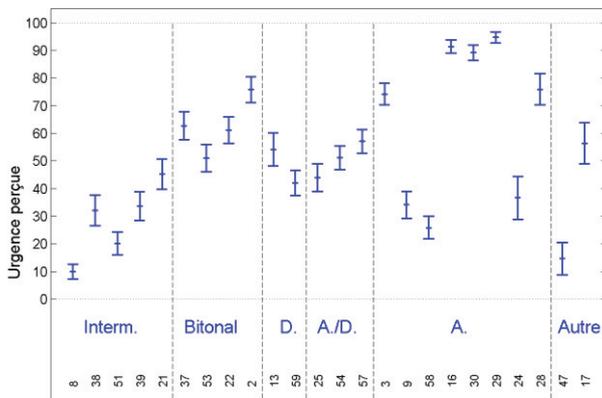


Figure 2: Evaluation de l'urgence perçue de chaque alarme, moyennée sur les 26 participants et les 3 passages. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les 24 alarmes sont réparties par types : respectivement intermittent, bitonal, rampe descendante, rampe ascendante et descendante, rampe ascendante, et autre. Les numéros d'alarmes correspondent à la numérotation de la documentation constructeur.

Cette figure montre également la répartition par type d'alarmes, ce qui permet de constater que certains types d'alarmes sont globalement perçus comme plus urgents que d'autres. Par exemple, les alarmes bitonales sont généralement perçues à un degré d'urgence plus important que les alarmes intermittentes. Toutefois la hiérarchie semble moins nette et moins systématique entre les autres types d'alarmes.

Plus globalement, cette figure permet de constater que 3 alarmes de type rampe ascendante en particulier se détachent assez nettement des autres, en termes d'urgence perçue : il s'agit des alarmes 16 (rampe 1500-2700 Hz de fondamentale, répétées à 3 Hz), 29 (800-970 Hz, à 9 Hz) et 30 (800-970, à 3 Hz). Parmi ces 3 alarmes, l'alarme 29 présente la moyenne la plus élevée, bien que sa différence avec les 2 autres n'apparaît pas significative. L'observation de ces résultats par passage de véhicule n'en change pas les conclusions. Enfin, les résultats ont également été comparés entre les 2 groupes de participants que l'analyse individuelle semblait dessiner. Cette analyse supplémentaire a révélé que cette décomposition du panel

de participants s'expliquait effectivement par des divergences d'évaluations de certaines alarmes, d'urgence perçue globalement faible ou moyenne. En revanche, les 3 alarmes identifiées globalement comme les plus urgentes le sont de manière consensuelle pour les 2 groupes.

Si les résultats de l'expérience ne montrent pas d'avantage significatif de l'une des 3 alarmes mentionnées ci-dessus sur les 2 autres, les alarmes 29 et 30 sont probablement à préférer à l'alarme 16. En effet cette dernière est fondée sur des fréquences fondamentales plus hautes que les 2 autres, ce qui limite grandement le contenu fréquentiel jusqu'à 1 kHz. Les hautes fréquences sont généralement plus facilement masquées par des obstacles ou atténuées par la propagation sur de longue distance (absorption atmosphérique), et les pertes d'audition liées à l'âge interviennent majoritairement en hautes fréquences. Au final, l'alarme n° 29 est conservée pour la seconde expérience.

3 Expérience 2 : Evaluation en simulateur

La seconde expérience a pour but à la fois de confronter l'alarme sélectionnée à une situation plus représentative de son application finale, et d'évaluer l'efficacité du dispositif de détection et de signalement d'anomalies dans sa globalité.

3.1 Participants

Quinze agents recrutés dans des sociétés d'autoroutes françaises et des Directions Interdépartementales des Routes ont participé à l'étude. Ils étaient âgés de 28 à 56 ans et disposaient d'une expérience de 3 à 29 ans. Tous avaient une vision normale et avaient tous connu au moins une expérience d'intervention en bord de route durant leur carrière (balisage, rebouchage de nids de poule, contrôle d'équipements, ramassage d'objets sur la chaussée, etc.).

3.2 Environnement de simulation

Le dispositif de simulation piéton à Versailles-Satory est l'une des plateformes immersives de l'IFSTTAR. Il s'agit d'un outil de réalité virtuelle qui permet le déplacement réel d'un piéton au sein d'un espace de 3,6m x 7,2m équipé d'écrans configurés sous la forme d'un U. Sur ces écrans sont projetées des scènes visuelles, pouvant représenter un trafic virtuel urbain, autoroutier, ou pré-urbain. Afin d'assurer l'interactivité de la simulation, la position de l'individu au sein du dispositif est enregistrée à chaque instant par un système de capture des mouvements. Pour les besoins de l'étude, une portion de chaussée où des travaux autoroutiers pouvaient être réalisés était simulée. Ainsi, la zone centrale du simulateur comprenait la voie de circulation de droite, la bande d'arrêt d'urgence, la glissière de sécurité et la partie d'accotement derrière la glissière de sécurité (cf. Figure 1). La simulation sur écrans représentait une circulation sur voie 2*2 à vitesse limitée à 110 km pour laquelle la voie de gauche et les deux voies de contre sens étaient simulées. La partie sonore du simulateur était composée de 10 haut-parleurs et 2 caissons de basses disposés derrière les écrans. Une technique VBAP (Vector Based Amplitude Panning) était utilisé pour la reproduction sonore 3D.

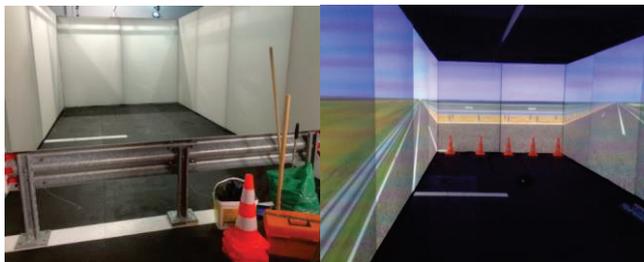


Figure 3 : Environnement de simulation d'une zone de chantier sur autoroute développé à l'IFSTTAR.

3.3 Procédure

Une alerte se déclenchait soit de manière sonore (alarme n° 29, cf. section 2.5), soit par vibration (grâce à un bracelet communiquant et vibrant porté par l'agent au poignet non dominant), lorsqu'un véhicule pénétrait dans la zone de chantier et était détecté par le prototype testé (caméras de détection). Celui-ci était positionné sur les flèches lumineuses de rabattement. Afin de tester la réaction des agents d'exploitation au plus proche de la réalité qu'ils rencontrent en situation réelle, de fausses alertes avaient été introduites dans les scénarios proposés. Enfin, d'autres scénarios simulaient une défaillance du système (véhicule dans la zone mais pas de déclenchement de l'alerte).

Le choix des tâches proposées à l'agent d'exploitation pendant la simulation était soumis à plusieurs contraintes : elles devaient être représentatives d'une intervention réelle sur autoroute mais répondre aux contraintes du simulateur en termes de conditions de sécurité et d'espace disponible, et être de durée suffisante pour tester la diversité des alertes. La reconstruction du sol du simulateur ainsi que l'ajout d'éléments réels de bord d'autoroute (borne de comptage, glissière de sécurité) a permis de mettre en place dans l'environnement autoroutier simulé 8 activités différentes allant de la réparation de nids de poule, à la mesure de fissures sur route, en passant par la vérification de documents lors de la réalisation d'un chantier.

Le type de danger pour l'agent variait également en fonction de la distance de celui-ci par rapport à l'agent : soit la collision se produisait sur la première Flèche Lumineuse de Rabattement (FLR) à 250 mètres du chantier (condition « FLR1 ») soit sur la deuxième FLR, plus proche de l'agent à 50 mètres du chantier (condition « FLR2 »). Le danger variait aussi selon la conséquence du franchissement en zone de chantier : soit le véhicule entrait dans la zone de chantier mais reprenait sa trajectoire (condition « évitement »), soit il y avait un choc réel sur la FLR, le fourgon ou le chantier selon la situation (condition « choc »).

Les participants étaient invités à réaliser les différentes tâches proposées. A un moment donné (mais variable entre les essais), soit une alerte d'intrusion de véhicules sur zone de chantier retentissait lorsqu'un véhicule y pénétrait réellement (vraie alerte), soit aucun véhicule n'y pénétrait (fausse alerte), soit aucune alerte ne retentissait alors qu'un véhicule pénétrait la zone (défaillance). Les données recueillies lors de cette étude portaient sur la réaction de

l'agent (mise en sécurité, freezing, non détection de l'événement). Pour ce recueil, l'expérimentateur notait le comportement de l'agent d'exploitation lorsqu'un événement se produisait. Une vérification était effectuée a posteriori sur les enregistrements vidéos réalisés durant l'étude. Le comportement de mise en sécurité est défini par le fait que l'agent quitte sa zone de travail lors d'un événement signalé ou non par alerte, dangereux ou non, pour se rendre soit sur la bande d'arrêt d'urgence, soit devant ou derrière la glissière de sécurité.

Enfin, les prototypes haptique et sonore étaient évalués au moyen d'une échelle d'acceptabilité [16] qui évalue en 10 items l'utilité et la satisfaction perçue d'un système, et d'un entretien semi-directif en fin de session. La pertinence du déclenchement de l'alerte sur la première FLR ou la seconde était également abordée lors de cet entretien.

3.4 Résultats

L'analyse des données a mis en évidence l'efficacité d'alerter l'agent du danger de l'intrusion d'un véhicule sur sa zone de chantier. La Figure 2 montre en effet que les agents se sont en effet plus souvent mis en sécurité lorsqu'une alerte (vraie ou fausse) était diffusée, (86,67% versus 35% ; $t = 2,26$; $p < 0,01$).

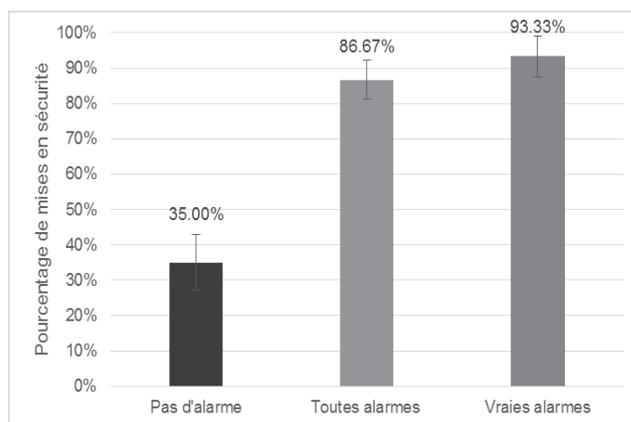


Figure 4 : Pourcentage de comportements de mise en sécurité en fonction du type d'alerte

La Figure 3 présente les résultats obtenus pour chaque modalité sensorielle utilisée (alerte sonore et alerte haptique). Il n'y a pas de différence significative dans le cas d'absence d'alerte entre les deux modalités sensorielles ($t = 0,81$; ns). En d'autres termes, il n'y a pas d'effet expérimental du bloc de passation sur le comportement des participants. En cas de vraie ou fausse alerte (« toutes alarmes »), l'analyse met en évidence une différence significative entre les deux modalités ($t = -3,5$; $p < .01$), la modalité sonore entraînant plus de mises en sécurité que la modalité haptique. Ce résultat est également observé pour les vraies et fausses alertes analysées séparément (vraies alertes : $t = 2,26$; $p < 0,05$; fausses alertes : $t = 2,97$; $p < 0,01$). Il semble que la modalité sonore potentialise les mises en sécurité lorsque le danger est réel, alors que la modalité haptique limite les mises en sécurité lorsque l'alerte n'est pas justifiée.

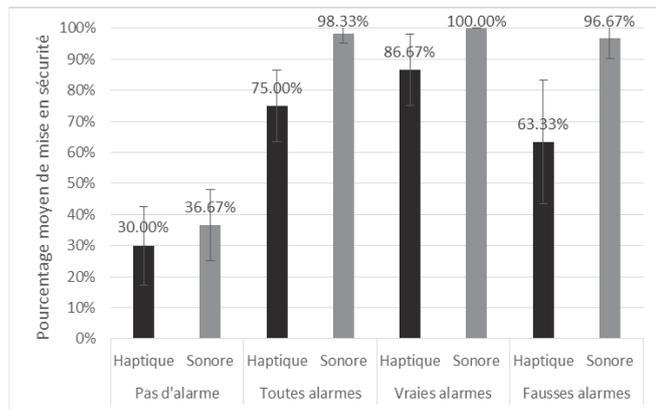


Figure 5. Pourcentage de comportements de mise en sécurité en fonction de la modalité sensorielle des alertes et en fonction du type d'alerte/

Suite à la phase d'entretien semi-guidé, 44% des participants ont déclaré préférer la modalité sonore d'alerte, contre 33% pour la modalité haptique (et donc 27% sans préférence). Concernant l'alerte sonore, 33% des participants déclarent que l'alerte sonore permet d'améliorer le temps de réaction (ex. « ça permet d'être très réactif »). Pour 27% d'entre eux, elle présente l'avantage d'être bien différenciée des sons d'alerte déjà existant (ex. « le son est bien différent des autres alertes comme les pompiers ou le SAMU ») et pour 20% des agents, elle permet un signal de danger collectif (ex. « ça alerte tout le monde même les visiteurs imprévus »). En revanche, les participants sont 40% à s'interroger de la compatibilité de l'alerte sonore avec leur équipement de protection sonore ou de l'environnement sonore des travaux aux alentours (ex. « ça semble incompatible avec le casque antibruit ou justement les bruits de gros chantier »). Certains agents (27%) recommandent d'augmenter le volume de celle-ci et de la rendre portable (ex. « Elle doit être beaucoup plus forte et portable »). Enfin, 20% des agents ont soulevé la problématique de l'interaction avec les usagers de la route (ex. « ça peut faire peur aux usagers et engendrer d'autres types d'incidents »).

Concernant l'alerte haptique, les avantages majoritairement décrits par les agents reposent sur sa meilleure intégration dans le présent contexte (pour 47%, ex : « on s'affranchit de l'environnement sonore ») et sa complémentarité avec l'alerte sonore en cas d'environnement bruyant (ex. « bon complément de l'alerte sonore » ; 47% des participants). Par ailleurs, 27% des participants trouvent l'alerte haptique confortable et 20% apprécient de l'avoir toujours sur eux. A l'inverse, 50% des agents souhaiteraient que l'intensité de la vibration soit bien plus importante, tout comme sa durée pour 27% d'entre eux. En outre, 27% s'interrogent sur le risque d'oubli de porter le dispositif (ex. « Peur d'oublier un dispositif d'alerte individuelle... comme le casque ») et 20% des participants s'interrogent sur la généralisation possible des situations de chantier dans l'utilisation du bracelet haptique (ex. « ça dépend de l'outil et du travail que l'on fait »).

Enfin les données issues de l'échelle d'acceptabilité révèlent une bonne réception des 2 dispositifs d'alerte puisque ceux-ci obtiennent des scores moyens supérieurs à 4 sur un maximum de 5. Par ailleurs, aucune différence significative n'est observée entre les 2 modalités sensorielles ($t = 1,96$; ns pour l'utilité, $t = 0,84$; ns pour la satisfaction).

3.5 Evaluation qualitative du dispositif

Lors de l'entretien de fin d'étude, nombre d'agents s'accordent sur l'apport du système en termes de sécurité, ayant tout de même conscience que l'utilisation de celui-ci doit se faire en complément de leur vigilance et des protocoles de sécurité déjà mis en place (éléments partagés par 76% des participants : ex. « ça ne peut qu'augmenter notre sécurité ». ; « C'est un bon outil sur lequel il ne faut pas se reposer à 100% » ; « il faut le voir comme une assistance »). L'argument principal repose sur l'augmentation de l'attention et de la concentration sur le risque qui peuvent diminuer au fur et à mesure de la tâche effectuée (ex. « Ce système permet d'améliorer l'attention, qui peut diminuer avec le temps et la concentration sur le travail »). Près de la moitié d'entre eux (47%) estime qu'un tel système devrait être mis en place systématiquement sur les chantiers et être une obligation au même titre que les systèmes déjà existants (ex. « ça devra être obligatoire de l'utiliser »). Le système est également jugé positivement quel que soit le type de chantier (pour 27% des agents ; ex. « Bien pour tous les chantiers » ; « Je l'utiliserai tout le temps ») et certains le projettent même sur d'autres conditions non testées dans notre étude comme des conditions climatiques détériorées ou des chantiers de nuit (27% ; ex. « c'est encore mieux la nuit parce que les gens roulent plus vite »). Les alertes sont donc globalement bien perçues et gagneraient pour la majorité des agents à être utilisables de manière collective et/ou individuelle. Certains envisagent même que le système serait sans doute capable de différencier le type de danger par le biais d'alertes différentes.

4 Conclusion

Augmenter la visibilité et la détection des zones de chantier, mais également renforcer les avertissements de danger tant du point de vue des usagers de la route que des agents de chantier, constituent l'enjeu majeur de ce dispositif. Le but était surtout de réduire le risque d'accident sur les zones de chantier. Les données recueillies ont ainsi permis, d'une part, d'évaluer le système de détection dans un environnement sécurisé, et d'autre part, d'apprécier le comportement des opérateurs en réaction au dispositif, en immersion dans un environnement simulé, reproduisant le contexte de leur activité professionnelle. Les résultats montrent que le dispositif pourrait permettre de réduire considérablement les risques d'accidents lors de l'intrusion de véhicules sur les zones de chantier. Plus spécifiquement, les comportements de mise en sécurité étaient plus nombreux en présence d'alertes. En revanche, lorsque le véhicule pénétrait dans la zone tampon (après la FLR de position) et ne déclenchait donc pas le système d'alerte, aucun agent n'a eu le temps de se mettre en sécurité, même ceux qui avaient détecté l'intrusion du véhicule. La modalité sonore s'est révélée être plus efficace que la modalité haptique, avec plus de mises en sécurité en cas d'alerte sonore. Les performances restent toutefois élevées quelle que soit la modalité, mais témoignent également d'un potentiel d'amélioration pour la modalité haptique.

Au final, la plupart des agents interrogés s'accorde sur l'apport du système d'alerte en termes de sécurité, ayant tout de même conscience que l'utilisation de celui-ci doit se faire en complément de leur vigilance et des protocoles de

sécurité déjà mis en place. Un tel système permet, selon eux, d'augmenter leur attention et leur concentration pendant leur activité. Près de la moitié d'entre eux estime qu'un tel système devrait être mis en place systématiquement sur les chantiers, et être une obligation au même titre que les systèmes déjà existants. Certains envisagent même que le système puisse être capable de différencier le type de danger par le biais d'alertes différentes. A long terme, les agents souhaiteraient même que le système YELLOW puisse détecter d'autres comportements que les intrusions qui peuvent aussi être dangereux tels que des rejets d'objets ou les chocs avec les cônes de protection.

L'observation de la réactivité des agents de chantier à se mettre en sécurité lorsqu'ils sont virtuellement menacés par un accident nous amène à penser, avec l'appui des verbalisations des participants, qu'ils étaient effectivement bien immergés et sont parvenus à se projeter dans leur situation de travail qui, par conséquent, leur paraissait réaliste. Toutefois, l'efficacité du dispositif ne pourra être concluante que dans le cadre d'une situation sur chantier réel. Dans cette optique, le dispositif d'alerte pour agents de chantier est actuellement en test en situation réelle.

Enfin, dans le cadre de ce projet il a été décidé d'utiliser les alarmes sonores produites par une sirène du commerce. Or la très grande majorité de ces sirènes ne produisent que des signaux tonaux, tandis que de nouveaux types signaux d'alerte large-bande commencent à émerger, principalement comme alarmes de recul. L'étude de Vaillancourt et al. [15] a démontré de nombreux avantages de ce type d'alarme : meilleure localisation, homogénéité spatiale, bonne audibilité, mais identifient également quelques inconvénients potentiels (propagation plus limitée, confusions possibles avec d'autres sources de bruit). Catchpole et al. [17] recommandent, quant à eux, de mixer le bruit large-bande avec une « rampe » fréquentielle croissante, ce qui pourrait combiner les avantages respectifs des alarmes de types bruit large-bande et tonal. Une phase de design sonore, explorant ces nouvelles sonorités d'alarme, pourrait permettre d'encore améliorer les résultats obtenus ici.

Références

- [1] CETE Normandie-Centre. *Accidents avec FLR ou FLU*, Rouen, France (2008).
- [2] Maze, T., Kamyab, A., & Schrock, S.. *Evaluation of work zone speed reduction measures*. Report No. 99-44. Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, Ames (2000).
- [3] Brewer, M., Pesti, G., & Schneider IV, W. (2006). Improving compliance with work zone speed limits effectiveness of selected devices. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1948*, 67-76 (2006).
- [4] Allpress, J. A., & Leland, L. S., Reducing traffic speed within roadwork sites using obtrusive perceptual countermeasures. *Accident Analysis & Prevention*, **42**(2), 377-383, (2010).
- [5] Arnold Jr, E. D., *Use of police in work zones on highways in Virginia* (No. FHWA/VTRC 04-R9) (2003).
- [6] Benekohal, R., Wang, M. H., Chitturi, M., Hajbabaie, A., & Medina, J., Speed photo-radar enforcement and its effects on speed in work zones. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2096*, 89-97 (2009).
- [7] Whitmire, J., Morgan, J. F., Oron-Gilad, T., & Hancock, P. A., The effect of in-vehicle warning systems on speed compliance in work zones. *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, **14**(5), 331-340 (2011).
- [8] Falzon, P., & Darses, F., La conception collective: une approche de l'ergonomie cognitive. *Coopération et conception*, Octarès, Toulouse, 123-135 (1996).
- [9] Darses, F., Brissaud, D., Cahour, B., Delabie, J. B., Garro, O., Lorant, F., & Poveda, O., *Intégration des points de vue en conception*. Rapport final de Recherche du projet INTEGRE. Paris, CNAM, 170 (2002).
- [10] N. E. Loveless et A. J. Sanford, The impact of warning signal intensity on reaction time and components of the contingent negative variation. *Biological Psychology*, **2**, 217-226, (1975).
- [11] R. D. Patterson, *Guidelines for the auditory warnings systems on civil aircraft*. London : Civil Aviation Authority, paper 82017, (1982).
- [12] J. Edworthy, S. Loxley et I. Dennis, Improving auditory warning design: relationship between warning sound parameters and perceived urgency. *Human Factors*, **33**, 205-231, (1991).
- [13] E. Hellier, J. Edworthy et I. Dennis, Improving auditory warning design : quantifying and predicting the effects of different warning parameters on perceived urgency. *Human Factors*, **35**, 693-706, (1993)
- [14] E. Hellier et J. Edworthy, On using psychophysical techniques to achieve urgency mapping in auditory warnings. *Applied Ergonomics*, **30**, 167-170, (1999).
- [15] V. Vaillancourt, H. Néglise, C. Laroche, C. Giguère, J. Boutin et P. Laferrière, Comparison of sound propagation and perception of three types of backup alarms with regards to worker safety. *Noise & Health*, **15**(67), 420-436, (2013).
- [16] Van Der Laan, J. D., Heino, A., & De Waard, D., A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, **5**(1), 1-10 (1997).
- [17] K. R. Catchpole, J. D. McKeown et J. D. Withington, Localizable auditory warning pulses. *Ergonomics*, **47**(7), 748-771, (2004).