



L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie



L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

► Auteurs

Xavier Cocu
x.cocu@brrc.be

Luc Goubert
l.goubert@brrc.be

Août 2019.

© CRR – Tous droits réservés.

Editeur responsable: Annick De Swaef, Boulevard de la Woluwe 42, 1200 Bruxelles.

► 1 Introduction

La littérature indique que **les lignes d'alerte audiotactiles** (LAA, parfois aussi nommées «bandes d'alerte sonores», ou encore «bandes rugueuses») – médianes ou de rive – **sont une contre-mesure efficace pour réduire les accidents survenant suite à une sortie de voie**. Le bruit et les vibrations produits par ces lignes alertent les conducteurs quand ils quittent la voie sur laquelle ils circulent.

Selon les études analysées par Elvik & Vaa (2004) [1], les bandes sonores de rive sont susceptibles de réduire le nombre d'accidents résultant d'une sortie de voie d'environ 30 %. Le NCHRP Report n° 641 (2009) [2] fait état de réductions importantes en matière de fréquence d'accident lorsque ces bandes sont mises en place sur des routes bidirectionnelles: 45 % à 64 % de réduction des accidents (mortels ou avec blessés) concernant des collisions frontales ou latérales suite à l'installation de bandes rugueuses médianes, et, 17 % à 34 % de réduction des accidents (mortels ou avec blessés) concernant des sorties de route à droite suite à l'installation de bandes rugueuses de rive.

Bien que les lignes d'alerte audiotactiles aient fait leurs preuves en termes de réduction des accidents par sortie de voie, l'utilisation de ce dispositif de sécurité reste limitée, probablement à cause de l'absence de lignes directrices pratiques et de l'idée qu'elles s'accompagnent de problèmes tels que la pollution sonore, la gêne pour les deux-roues et une difficulté d'entretien. Ce dossier a comme objectif de décrire les différents dispositifs qu'il est possible d'installer, leurs caractéristiques géométriques et leur efficacité afin de synthétiser les paramètres pratiques principaux entrant en ligne de compte, et ainsi d'aider le gestionnaire dans sa décision de conception et de placement afin de maîtriser les inconvénients cités ci-avant, aux fins de réduire le nombre d'accidents par sortie de route.

Ce document repose principalement sur une analyse approfondie de la littérature américaine (les bandes d'alerte sonores y étant abondamment utilisées) et des résultats du projet français *Roadsense* (chapitres 2 à 4). Le chapitre 5 propose, sous la forme d'une liste de questions, une aide à la décision pour guider les concepteurs et les gestionnaires dans le choix de recourir à l'usage des lignes d'alerte audiotactiles. Enfin, le chapitre 6 présente les conclusions de toute cette démarche, ainsi que les perspectives en termes d'études complémentaires, veille technologique et développement futur.

Roadsense

Le projet *Roadsense* (terminé fin 2013) traitait de l'étude des «lignes routières d'alerte audiotactiles (LAA)», dans une optique de réduction des accidents associés à une sortie involontaire de voie non liée à la vitesse (sortie véhicule seul par défaut de guidage latéral, donc hors sorties avec perte de contrôle du véhicule à l'état initial). Entre 2010 et 2013, ce type d'accident représentait 12 à 20 % des tués en France, plus particulièrement en rase campagne.

Les partenaires du projet *Roadsense* se sont attachés à :

- approfondir les connaissances sur les mécanismes d'accident par sortie involontaire de voie;
- optimiser la perception des LAA et leur compréhension par les conducteurs;
- évaluer leur effet et préciser leur domaine d'emploi pour différents types d'usagers/véhicules, sur différents types de route.

www.roadsense2013.eu

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

2 Objet et description générale

Les lignes d'alerte audiotactiles sont conçues principalement pour aider les conducteurs distraits, somnolents, ou inattentifs et qui peuvent involontairement dévier hors de la voie. Pour ces circonstances, l'avertissement sonore et vibratoire produit améliore fortement la possibilité d'une récupération de la trajectoire.

L'efficacité des LAA dépend de l'angle de sortie du véhicule. **Plus le véhicule quitte sa voie de circulation avec un angle élevé, moins les LAA sont efficaces.** En effet, la durée d'activation et le temps de lecture de la LAA sont réduits et il devient alors plus difficile d'alerter le conducteur. De plus, la distance parcourue vers l'accotement est reliée à l'angle de sortie et à la vitesse initiale du véhicule. Selon Anelli et Violette (2014) [3], une grande part des sorties involontaires de voie couverte par les LAA présentent des angles de sortie faibles, inférieurs à 4 degrés (les angles de sorties élevés étant davantage observés dans les cas de pertes de contrôle liées à la vitesse et en virage).

Les LAA sont donc particulièrement indiquées pour les sections présentant un alignement horizontal rectiligne et une sollicitation visuelle faible. C'est dans ces sections les plus propices à l'hypovigilance et à l'inattention que les lignes d'alerte seront à la fois les plus utiles et les plus efficaces.

Il existe **deux types principaux** de lignes d'alerte audiotactiles: les fraisées, aussi appelées «engraves» (à relief négatif), et celles qui sont surélevées (à relief positif).

Les recherches réalisées dans le domaine indiquent que les paramètres principaux qui influencent le bruit (rôle d'alerte) des bandes rugueuses fraisées sont la profondeur et la largeur.

Les premières installations ont aussi parfois consisté en des bandes rugueuses formées dans les revêtements en asphalte ou en béton (par le passage d'un rouleau équipé de barrettes sur l'asphalte chaud, ou l'application d'un gabarit dans le béton frais). Toutefois, ces techniques semblent être devenues obsolètes pour des raisons liées aux dimensions (trop limitées) et à la constructibilité (sensible aux conditions de température du revêtement au moment de la réalisation); elles ne sont en outre praticables qu'au moment de la pose d'un nouveau revêtement.



Figure 1 – Caractéristiques des LAA fraisées (FHWA Office of Safety Website [4])



Figure 2 – Aperçu de produits utilisés pour les LAA à relief positif (Rosey & al, 2011 [5])

Les **LAA fraisées** sont réalisées à l'aide d'une raboteuse. Aux Etats-Unis, les dimensions les plus fréquemment rencontrées sont les suivantes:

- largeur: entre 12,7 cm et (plus courant) 17,8 cm;
- espacement: 30,5 cm;
- profondeur: 13 mm;
- longueur: entre 30,5 cm et (plus courant) 40,6 cm.

La variation de ces paramètres influence le bruit et la vibration pour le conducteur. Les **dépôts** les plus courants, par rapport au marquage de rive, sont de 15,2 cm et 30,5 cm.

Les **LAA surélevées** peuvent être réalisées à partir d'un large éventail de produits (plastique, céramique, thermoplastique, plots réflectorisés, etc.) et installées suivant différentes méthodes détaillées dans la suite. Leur hauteur varie de 6 mm à 13 mm; les autres dimensions dépendent de la technique utilisée.

La littérature fait état d'études et expérimentations (en particulier le projet *Roadsense*) visant à optimiser ces dispositifs (motif élémentaire, hauteur, distance intermotif, pour améliorer la perception et réduire le temps de réaction, tenant compte des différents types de véhicule). Recherche et expérimentations qui se poursuivent encore à ce jour.

Des marquages routiers structurés ou profilés qui améliorent la visibilité de nuit par temps de pluie (VNTP) ou des systèmes plans couplés à des barrettes (les deux en thermoplastique) sont les seuls dispositifs se rapprochant des lignes d'alerte audiotactiles et qui sont actuellement décrits dans les cahiers des charges belges (tableau 1).

Ils étaient initialement destinés à maintenir le guidage visuel des usagers la nuit par temps de pluie; leur utilisation a ensuite partiellement évolué vers la prévention des sorties de route par la droite.

Wallonie

Le **CCT Qualiroutes** (version 2016 consolidée) [6] définit les marquages «vibrants» comme étant des systèmes profilés. Le caractère vibrant n'y est pas défini.

Chapitre L. 4.2.1.2.: «Les systèmes profilés produisent un effet sonore ou mécanique (vibration) lorsqu'ils sont circulés par un véhicule. Ils sont donc déconseillés en agglomération ou en zone urbanisée. Ils présentent une alternative afin d'assurer une bonne visibilité nocturne par temps de pluie (VNTP) car ils permettent une bonne drainabilité de l'eau de ruissellement.»

En pratique, deux systèmes sont actuellement utilisés en Wallonie:

- les systèmes VNTP (définis dans le CCT Qualiroutes). Ils ont été développés non pas pour l'effet sonore mais bien pour leurs performances en conditions de visibilité dégradées. Ils sont actuellement recommandés (dans le chapitre L. Modèle) pour les rives et axes sur autoroutes et routes à 2*2 voies;
- les systèmes plans couplés à des barrettes (les deux sont en thermoplastique). La hauteur maximale par défaut est fixée à 1 cm pour les barrettes et la fréquence de pose est de 5 unités par mètre. Ils ne font pour l'instant pas l'objet de recommandations de pose.

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

Flandre

Le *Vademecum Vergevingsgezinde wegen* [7] indique que le bénéfice d'une zone de récupération peut être accentué, sur les autoroutes et dans les tunnels, par l'utilisation d'un marquage en saillie (*ribbelmarkering*) ou toute autre forme de marquage qui avertit le conducteur qu'il dévie de sa voie. Le vademécum note, cependant, que l'utilisation de ces marquages n'est pas toujours et partout souhaitable suite aux contraintes sonores qu'il engendre.

Le chapitre 2 - § 5.2.1.2 *Speciale oppervlakstructuren* du **cahier des charges type SB 250** [8] (v.4.1) distingue également les marquages routiers qui améliorent le pouvoir rétroréfléchissant, des marquages routiers présentant des propriétés acoustiques:

Chapitre 2 - § 5.2.1.2.A: «Les marquages routiers structurés ou profilés augmentent la capacité rétroréfléchissante sur revêtement mouillé. Ceci est réalisé en créant une surface irrégulière, tant transversalement que dans le sens longitudinal. Le marquage ne doit pas avoir une structure plane. L'épaisseur de la surface varie. Les marquages structurés ou profilés sont également connus sous les noms de *dotmarkering* (points) ou *spettermarkering* (splash).».

Chapitre 2 - § 5.2.1.2.B: «Les structures de marquage spéciales sont parfois destinées à produire des effets acoustiques et/ou mécaniques et/ou visuels pour améliorer la sécurité du trafic.».

5.2.1.2.B.2 Marquage en saillie

Le but de ces marquages en saillie est de fournir aux conducteurs un signal audible et perceptible lorsqu'ils dévient de la chaussée et ainsi les mettre en garde du risque de sortir de la chaussée. De cette manière, ils peuvent encore corriger leur trajectoire à temps. Il convient d'appliquer le marquage le long de longues lignes droites et pas dans les virages des bretelles, sauf dans la courbure intérieure.

Ces marquages profilés sont réservés aux routes principales. Ils peuvent être utiles comme simple ligne de rive, ou comme ligne marquant une frontière entre la chaussée suivie et une piste cyclable immédiatement adjacente (ils sont moins agréables comme marquage pour les vélos). En général, ils doivent toutefois être utilisés avec prudence en raison du niveau de bruit qu'ils génèrent (chapitre 10 - § 2.1.3.4).

Les saillies transversales sont au moins $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ plus hautes que le reste du marquage. La largeur d'une saillie est égale à 5 cm sur toute sa longueur, et la distance entre deux saillies est de 15 cm. La saillie a la même largeur que le marquage sous-jacent. Le marquage continu sous-jacent présente 3 mm d'épaisseur (chapitre 10 - § 2.3.4.6.H).

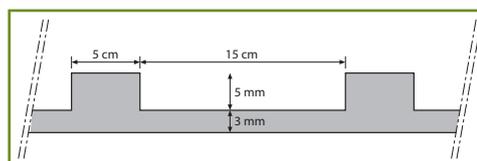


Tableau 1 – Systèmes profilés et marquages vibrants dans les CCT wallon et flamand

Les dispositifs présentés dans ce dossier, et décrits ci-après, sont, en bonne partie, d'une autre nature ou présentent des caractéristiques géométriques différentes. Leur utilisation n'est à ce jour que très peu cadrée par les CCT régionaux.

► 3 **Fonctionnement des lignes d'alerte audiotactiles**

Selon le guide NCHRP 641 [2], la littérature indique que pour alerter un conducteur inattentif, distrait, fatigué ou somnolent, les bandes rugueuses (ou lignes d'alerte audiotactiles – LAA) devraient générer une augmentation du niveau sonore de 3 à 15 dBA au-delà du niveau sonore ambiant à l'intérieur du véhicule. Ce guide recommande de retenir l'augmentation de 3 dBA comme valeur minimale absolue pour la conception des bandes rugueuses et de considérer une augmentation de 6 dBA comme valeur minimale souhaitée. Par ailleurs, une augmentation du niveau sonore de 15 dBA semble être la valeur de conception maximale à considérer.

Sur les routes où les cyclistes ne sont pas présents (considérant qu'ils peuvent être gênés par ces dispositifs placés en bord de voie) comme sur les autoroutes, il est recommandé de sélectionner des motifs de bande rugueuse pouvant générer environ 10 à 15 dBA au-dessus du niveau de bruit ambiant dans le véhicule.

En France, le projet *Roadsense* a permis (au travers d'essais en laboratoire, sur piste et sur route) d'approfondir les connaissances à propos de la perception par les conducteurs des divers types de LAA (engravures, barrettes et «boutons»), et d'identifier les géométries et motifs les plus efficaces en termes d'émergence sonore.

L'émergence sonore est la différence, à une même vitesse et pour un véhicule donné, entre le niveau sonore mesuré (à l'intérieur du véhicule) en roulant sur le dispositif et le niveau mesuré en roulant sur la surface routière seule.

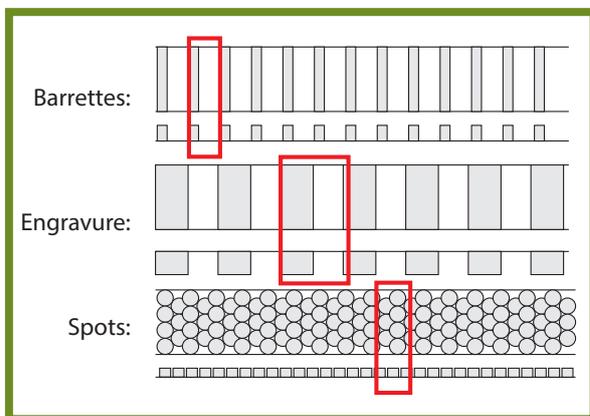
Les paragraphes suivants en présentent une brève synthèse.

Les expérimentations ont notamment porté sur la compréhension du **fonctionnement des LAA et l'optimisation des motifs** afin que les signaux sonores perçus par les conducteurs soient suffisamment audibles par rapport au bruit de fond du véhicule. La perception et l'efficacité de ces dispositifs dépend à la fois de leurs émergences sonore et vibratoire, de la durée et de la qualité du signal sonore émis, lesquels sont influencés par la structure des lignes (continue, discontinue, alternée), leur largeur, leur hauteur et la distance intermotif.

3.1 Structure des dispositifs

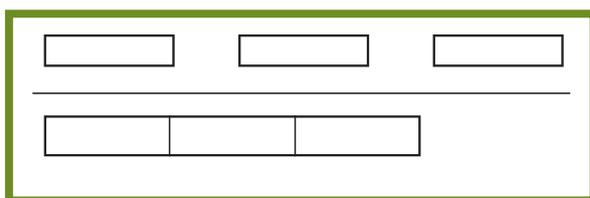
Les dispositifs présentent plusieurs niveaux de structuration influençant la perception que l'on aura dans et hors du véhicule. Le premier niveau de structuration est le motif élémentaire (figure 3). Ce motif, reproduit sur une longueur suffisante, constitue le fondement du signal audiotactile. Sa forme – longitudinale et transversale – combinée à la vitesse du véhicule influence significativement le niveau d'émission vibro-acoustique perçu par le conducteur.

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie



Ce motif varie suivant le type de dispositif (barrettes, engravure ou spots), la période du motif élémentaire et la forme (hauteur, etc.). Les motifs testés ont une forme périodique dont la longueur élémentaire constitue un des facteurs élémentaires de perception. La fréquence fondamentale du signal dépend de la vitesse et de l'espace entre les barrettes, les «trous» ou les rangées de «billes». Associée à la vitesse du véhicule, elle donne la **fréquence fondamentale du signal perçu**.

Figure 3 – Motifs élémentaires [9]



Le second niveau de structuration correspond à un cadencement des groupes de motifs élémentaires. Ce cadencement peut être induit, ou pas, par la géométrie des marquages.

Figure 4 – Exemple de cadencement des groupes de motifs élémentaires [9]

L'influence des paramètres structurels des dispositifs sur le temps de réaction a été étudiée en cabine audiométrique en s'intéressant à l'émergence et à la modulation des signaux sonores. Les analyses ont conduit à retenir les configurations avec des pas le plus rapprochés. Des IOI courts (figure 5), donnant une modulation rapide d'un signal sonore élémentaire entrecoupé de brefs silences, se sont révélés plus performants en termes de temps de réaction.

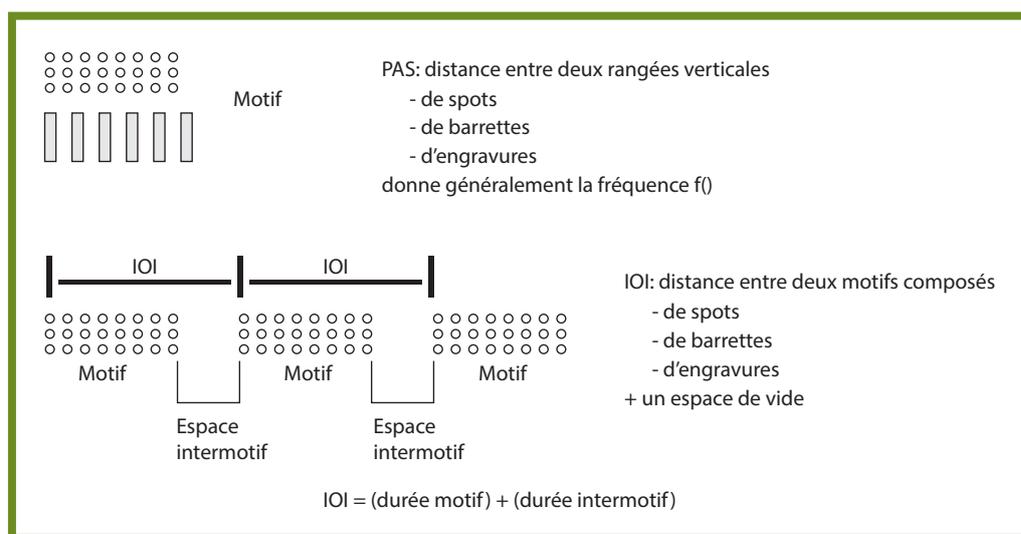


Figure 5 – Modèle d'alarme audiotactile [10]

Lors d'un test d'**acceptabilité** de différents types de LAA (marquages profilés ou structurés, barrettes noires, engravures) réalisé lors de l'expérimentation sur simulateur de conduite, les dispositifs ont été jugés utiles, efficaces et non dangereux par les participants. Les engravures sont apparues mieux comprises et leur composante vibratoire mieux perçue que les autres dispositifs.

3.2 Optimisation des dispositifs

L'optimisation des dispositifs s'est également appuyée sur des expérimentations sur piste réalisées avec différents types de véhicules: voiture (VL), véhicule utilitaire (VU) et poids-lourd (PL).

La déclinaison des dispositifs sur piste a été réalisée pour permettre une analyse des facteurs pouvant influencer significativement sur la perception (**lien entre description physique** – géométrie des motifs élémentaires et «textures» – **et perception des dispositifs**) et, de définir les possibilités d'optimisation en fonction des cibles accidentologiques (VL, PL), de l'acceptabilité des usagers, etc. [9].

Les dispositifs présentés au tableau 2 (p. 10) ont été étudiés.

Du point de vue de l'**émergence sonore**, il est ressorti de l'analyse que:

- les engravures et les barrettes induisent les plus fortes émergences (entre 10 et 20 dB pour les VL et VU). Elles présentent d'ailleurs les géométries les plus agressives (hauteur ou profondeur > 1 cm);
- les spots induisent des émergences significativement plus faibles. Ils présentent eux des géométries peu agressives (hauteur < 5 mm);
- la perception dans les véhicules diffère suivant le type de dispositif:
 - les VL répondent parfaitement aux excitations induites par tous les types de dispositifs;
 - les VU répondent bien aux excitations induites par les dispositifs mais peuvent présenter des confusions notamment sur les aspects vibratoires de certains dispositifs;
 - les PL répondent bien sur les engravures (de la même façon que les VL sur les barrettes). Par contre, ils répondent moins bien sur les barrettes et très peu sur les spots;
- la hiérarchie suivante a pu être établie:
 - pour les spots: AD5 > AD4 > AD3 > AD6 > AD2 > AD1;
 - pour les barrettes: AG4 > AG3 > AG5 > AG2 > AG1;
 - pour les engravures: E1 = E3 > E2.

Les bandes rugueuses génèrent à la fois des **vibrations** et du bruit. Il n'y a toutefois pas de consensus sur le rôle respectif des composantes sonore et vibratoire dans le processus d'alerte des conducteurs. En réalité, il est probable que ce soit la combinaison des deux stimuli qui fournisse les propriétés d'alerte. Le poids de la contribution de chaque composant n'est toutefois pas connu. Dès lors, il n'existe pas de recommandations quant au seuil minimal de vibration nécessaire pour alerter les conducteurs inattentifs.

Les essais menés dans le cadre du projet *Roadsense* ont indiqué que la vibration est très différente d'un dispositif à l'autre du fait de sa fréquence et de la géométrie des dispositifs: **les spots sont peu vibrants** et quasiment dans le bruit de fond généré par le revêtement, **les barrettes et les engravures pré-**

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

Type	Caractéristiques	Longueur du motif élémentaire Profondeur / Epaisseur	Position
Spots	8 points/ligne	4 cm 0,03 cm	A-D-1
Spots	8 points/ligne	5/6 cm 0,03 cm	A-D-2
Spots	8 points/ligne	8/9 cm 0,03 cm	A-D-3
Spots	8 points/ligne	19/20 cm 0,03 cm	A-D-4
Spots	4 points/ligne Double matière	10 cm 0,03 cm	A-D-5
Spots	4 points/ligne Double matière	16 cm 0,03 cm	A-D-6
Engravure	Négatif	40 cm (largeur: 20 cm, profondeur: 1 cm)	E1
Barrettes	Appli 1	2,03 m 1 cm	A-G-1
Barrettes	Appli 1	1,03 m 1 cm	A-G-2
Barrettes	Appli 2	0,51 m 1 cm	A-G-3
Barrettes	Appli 2	30/22 cm 1 cm	A-G-4
Barrettes	Appli 2	1,02 m 1 cm	A-G-5
Engravure	Négatif	1 m (largeur: 50 cm, profondeur: 1,5 cm)	E2
Engravure	Négatif	1 m (largeur: 20 cm, profondeur: 1,5 cm)	E3

Tableau 2 – Caractéristiques des dispositifs testés lors d'essais sur piste dans le cadre du projet Roadsense

sentent une bonne émergence vibratoire. Cette émergence est bien sûr **variable suivant le type de véhicule**. Elle est significative dans les VL alors qu'elle est très faible dans les PL.

Les engravures présentent les émergences vibratoires les plus importantes, de l'ordre de 0,6-1 g sur VL. Elles sont peu précises et très intrusives. Elles ont tendance à vibrer toute la caisse du véhicule. Les barrettes présentent des émergences inférieures de l'ordre de 0,2-0,6 g. Ces dispositifs présentent une bonne émergence vibratoire et offrent un signal précis et moins intrusif que les engravures. Les dispositifs AG3 et AG4 sont les plus émergents.

Les engravures sont perçues comme fortes. La sensation vibratoire, pouvant accaparer l'attention, est considérée comme plutôt pénible. Les barrettes sont significativement perçues et considérées comme plutôt désagréables. Les spots sont faiblement perçus surtout en vibration.

3.3 Conclusions des essais en laboratoire et sur piste

Les planches expérimentales réalisées à partir des différents dispositifs existants et des premières analyses permettent une meilleure connaissance et un premier pas vers leur optimisation. Les analyses et expérimentations physiques, vibro-acoustiques et perceptives permettent de préciser les paramètres principaux (cadences élémentaire, secondaire, géométrie, etc.) applicables pour tous véhicules.

Les engravures et barrettes sont des dispositifs vibrants, contrairement aux spots. Les engravures engendrent une émergence vibratoire légèrement supérieure à celle des barrettes. Toutefois, les vibrations n'influent pas sur le temps de réaction (et ne sont donc pas nécessaires en termes de temps de réaction). Elles peuvent par contre permettre une meilleure reconnaissance de l'évènement.

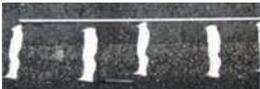
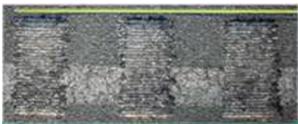
▪ LAA optimisées de type barrettes et engravures		▪ Marquages de type «boutons» ou «spots»
Alerte très efficace des VL et efficace des PL		Alerte efficace des VL sous certaines conditions (spots de grandes dimensions, appliqués en rangées comme barrettes). Alerte non efficace des PL
 <p>AG3 barrettes sans semelle; pas entre 2 bandes: 51 cm; épaisseur: 1 cm.</p>	 <p>AG4 barrettes sans semelle; pas entre 2 bandes: 30 cm + 22 cm; épaisseur: 1 cm.</p>	 <p>AD4 8 points/longueur; pas entre 2 bandes: 19 cm + 20 cm; épaisseur: 3 mm.</p>
 <p>E1 pas entre 2 bandes: 40 cm; largeur: 20 cm; profondeur: 1 cm.</p>	 <p>E3 pas entre 2 bandes: 100 cm; largeur: 20 cm; profondeur: 1,5 cm.</p>	 <p>AD5 4 points/longueur; pas entre 2 bandes: 10 cm + 10 cm; épaisseur: 3 mm.</p>

Figure 6 – Caractéristiques des dispositifs «optimisés» du point de vue de l'émergence sonore dans le cadre du projet Roadsense

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

La méthode d'évaluation de l'émergence sonore permet une bonne discrimination des dispositifs audiotactiles. Les barrettes et engravures engendrent une émergence sonore supérieure à celle des *spots*.

	PL	VL	
Spots AD4, AD 5	4	12	Emergence sonore dB(A)
Barrettes AG3, AG4	5	12	
Engravure E1, E3	6	16	

Les émergences sonores dans les poids-lourds sont significativement plus faibles quel que soit le type de dispositif. Les dispositifs évalués comme les plus émergents sont:

- spots: AD4 et AD5;
- barrettes: AG3 et AG4;
- engravures: E1 et E3.

Tableau 3 – Dispositifs les plus émergents

Les dispositifs AG2, AG5 et AD6 sont également intéressants du point de vue de l'émergence sonore (bien que moins «optimisés») et sont moins coûteux en matière.

Par ailleurs, comme la fréquence sonore fondamentale dépend du motif (plus le motif est court, plus elle est élevée) et augmente avec la vitesse, on peut imaginer conserver une fréquence équivalente suivant le type de voie, la classe de vitesse et l'utilisation routière (et assurer la continuité des signaux et donc leur meilleure reconnaissance) en adaptant le motif élémentaire.

► 4 Caractéristiques des lignes d'alerte audiotactiles

4.1 Lignes d'alerte audiotactiles «fraisées» (à relief négatif)

Les LAA obtenues par fraisage, également appelées «engravures», sont principalement utilisées en Amérique du Nord et en Scandinavie. Selon le FHWA [4], elles sont très répandues aux Etats-Unis en raison de leur facilité de construction, de leur durabilité, de leur polyvalence, et de leur coût. Leur utilisation suppose l'existence d'un accotement revêtu (une distance minimum de 0,60 m est nécessaire pour pouvoir implanter des engravures) et d'une couche de roulement suffisamment épaisse.

Les **bandes rugueuses fraisées** (*milled*) sont réalisées à l'aide d'une raboteuse. De manière générale, plus l'engravure est large et profonde (respectivement C et D sur les illustrations suivantes), plus le bruit et la vibration seront importants. Aux Etats-Unis, les dimensions les plus fréquemment rencontrées en rive sont:

- **largeur** (C): 12,7 cm (5") à (plus courant) 17,8 cm (7");
- **espacement** (E): 30,5 cm (12");
- **profondeur** (D): 13 mm (0.5");
- **longueur** (B): 30,5 cm (12") à (plus courant) 40,6 cm (16").

La variation de ces paramètres influence le bruit et la vibration pour le conducteur. Les **dépôts** (A) les plus courants, par rapport au marquage de rive, sont de 15,2 cm (6") et 30,5 cm (12").

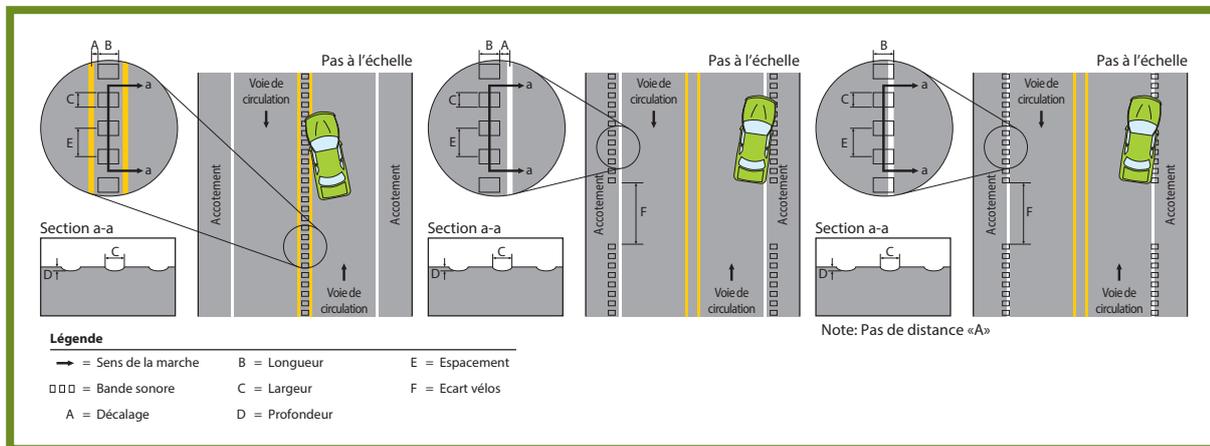


Figure 7 – Caractéristiques dimensionnelles des bandes rugueuses (axiales et en rive)

Pour les **bandes rugueuses médianes/en axe** (également réalisées par fraisage), les dimensions types sont:

- **largeur (C):** 17,8 cm (7");
- **espacement (E):** 30,5 cm (12");
- **profondeur (D):** 13 mm (0,5");
- **longueur (B):** 30,5 cm (12") à 40,6 cm (16"). Aux Etats-Unis, elles sont habituellement fraisées entre les deux marquages axiaux.

Selon la littérature, les **dimensions les plus courantes de bandes rugueuses fraisées utilisées en rive aux Etats-Unis – 40,6 cm de long, 17,8 cm de large, 13 à 16 mm de profondeur, et 30,5 cm d'entre-distance** – génèrent une quantité suffisante de bruit dans la gamme supérieure des seuils de conception recommandés (10 à 15 dBA). Ces dimensions peuvent être considérées comme un modèle relativement «agressif» et sont considérées comme appropriées pour une utilisation sur les routes où les cyclistes ne sont pas présents (voir § 4.3.2). Le modèle – 12,7 cm de large, 10 mm de profondeur, et entre-distance comprise entre 28 et 30,5 cm – offre quant à lui un compromis raisonnable entre les besoins des cyclistes et des automobilistes. Dans ce cas, les bandes rugueuses conçues avec des longueurs plus étroites (p. ex. 15,2 cm pour fournir un dégagement latéral supplémentaire pour les cyclistes ou simplement installer des bandes rugueuses sur les routes avec des accotements étroits ou inexistantes) peuvent encore générer les différences de niveau sonore désirées pour alerter les conducteurs inattentifs, distraits, somnolents, fatigués (en notant que, vu la taille des pneus des PL, l'effet semble être fortement atténué pour ces véhicules).

Les résultats des évaluations de sécurité réalisées avec des bandes rugueuses de rive sur les autoroutes en milieu rural impliquent que les dimensions actuelles de ces bandes fournissent des niveaux suffisants de stimuli pour alerter les conducteurs de poids-lourds inattentifs et somnolents, et qu'il n'est pas nécessaire de concevoir des modèles de bandes rugueuses plus agressifs pour les besoins des conducteurs de ces véhicules.

Les résultats du projet *Roadsense*, présentés au § 3.3, concordent avec les recommandations émanant des Etats-Unis. Le dispositif E1 présente en effet des caractéristiques géométriques similaires aux engravures américaines.

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

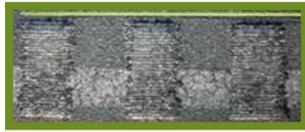


Figure 8 – E1 (pas entre 2 bandes: 40 cm; largeur: 20 cm; profondeur: 1 cm)

Par ailleurs, les essais de mise en œuvre de lignes d'alerte par engravures montrent que les dispositifs techniquement les plus faisables sont les engravures E3 (du point de vue du temps d'exécution et du volume de fraisat).



Figure 9 – E3 (pas entre 2 bandes: 1 m; largeur: 20 cm; profondeur: 1,5 cm)

Les pratiques diverses constatées du point de vue du **déport** par rapport au marquage de rive s'expliquent par divers facteurs: la volonté de fournir un dégagement latéral suffisant pour que les cyclistes puissent rouler le long des bandes rugueuses sans les toucher, le souhait de minimiser le nombre de passages de véhicules automobiles sur les bandes rugueuses afin de ne pas causer trop de bruit pour les riverains, et enfin, celui de permettre l'installation de bandes rugueuses le long des routes avec des accotements étroits, voire inexistantes.

Pour les autoroutes, il est recommandé, sur base des analyses de sécurité, que les bandes rugueuses soient placées aussi près du marquage de rive que possible ou même sur celui-ci (pour offrir plus de chances de récupération); tout en tenant compte d'autres facteurs tels que la localisation des joints de la chaussée. Pour les autres types de routes, comme les routes rurales à deux voies, il n'y a pas de preuve concluante indiquant que le déport par rapport au marquage de rive a un impact sur l'efficacité des bandes rugueuses.

A propos des bandes rugueuses fraisées médianes/en axe, les données d'accident suggèrent que les véhicules lourds devraient potentiellement être pris en compte dans leur conception. Il est donc recommandé que les modèles de bandes rugueuses fraisées médianes soient conçus pour générer environ 10 à 15 dBA au-delà du niveau de bruit ambiant dans le véhicule.

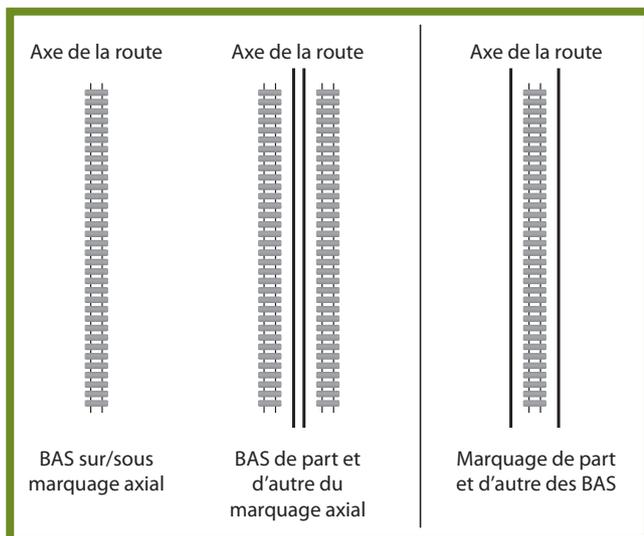


Figure 10 – Position des bandes rugueuses médianes aux Etats-Unis (Rosey & al, 2011 [5])

Aux Etats-Unis, la mise en place de bandes rugueuses médianes peut se faire entre les marquages de la chaussée, sur le marquage en se prolongeant sur la voie circulée, ou se situer de chaque côté des marquages centraux.

Il est également courant d’interrompre les bandes rugueuses médianes à hauteur des intersections, sur les structures (ponts), à proximité (200 m) et le long des zones résidentielles.

4.2 Lignes d’alerte audiotactiles «surélevées» (à relief positif)

Selon Susini & al (2013) [11], pour optimiser le temps de réaction à une alarme sonore lorsque la personne est en train d’effectuer une tâche lui demandant de l’attention, il est préférable que celle-ci ait un **niveau sonore élevé** en faisant attention à l’effet de sursaut, avec une **fréquence plutôt élevée et un IOI** (= durée motif + durée intermotif) **plutôt court** (figure 5).

La fréquence fondamentale d’un son produit par une série de bandes audiotactiles est fortement dépendante du pas entre les dispositifs (plus le pas est resserré entre deux bandes consécutives, plus la fréquence fondamentale est élevée). Il s’agit donc de chercher à obtenir une fréquence fondamentale élevée pour minimiser le temps de réaction, sachant que les machines pour appliquer les bandes audiotactiles permettent d’obtenir des espacements les plus courts pour les spots, et que les engravures induisent le pas le plus important parmi les trois types de dispositifs. Néanmoins, le pas doit être en adéquation avec la taille des pneus des véhicules (PL/VL) afin que la configuration du pneu ne masque pas la géométrie du dispositif.

Dans le cadre du projet *Roadsense*, la poursuite de l’étude de l’influence des paramètres structurels des dispositifs sur les temps de réaction a abouti à sélectionner les motifs suivants (parmi ceux testés) par type de dispositif pour les dispositifs à relief positif.



Figure 11 – AG4 (barrettes sans semelle; pas entre 2 bandes: 30 cm + 22 cm; épaisseur 1 cm)



Figure 12 – AD5 (4 points/ longueur; pas entre 2 bandes: 10 cm + 10 cm; épaisseur 3 mm)

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

4.3 Quand et où utiliser ces dispositifs

Bien que les bandes rugueuses aient été largement utilisées, aux Etats-Unis, dans les zones rurales où les problèmes de sortie de route existent, l'utilisation sur les autoroutes urbaines ou d'autres routes fonctionnellement classées comme urbaines est également efficace [12]. Ce sont surtout le contexte de la route et les caractéristiques de la section transversales qui seront déterminants dans le choix d'utiliser une bande rugueuse. Les éléments qui limitent souvent l'utilité ou l'application des bandes rugueuses incluent des vitesses faibles, le bruit pour les riverains (voir § 4.3.4), la largeur de la chaussée, la présence d'un trottoir ou d'une rigole et la présence d'accès (nombreux mouvements et possibles conflits). La présence de cyclistes (voir § 4.3.2) et l'épaisseur du revêtement (voir § 4.3.3) seront également déterminantes dans le choix de la bande rugueuse.

4.3.1 Domaine d'utilisation

Les LAA sont donc particulièrement indiquées pour les **sections présentant un alignement horizontal rectiligne et une sollicitation visuelle faible** [3]. C'est dans ces sections les plus propices à l'hypovigilance et à l'inattention que les lignes d'alerte seront à la fois les plus utiles et les plus efficaces.

Bien entendu, la présence d'une **zone de récupération** (accotement revêtu ou stabilisé) augmente les chances de l'utilisateur de pouvoir retourner sur la voie de circulation sans perdre le contrôle du véhicule. Si les LAA ont a priori une meilleure efficacité sur routes à chaussées séparées comprenant une bande d'arrêt d'urgence (BAU) revêtue, elles semblent aussi utiles sur les routes bidirectionnelles. Placée dans la voie de circulation (à l'intérieur de la ligne de marquage de rive), une LAA est à même d'alerter l'utilisateur dont la trajectoire dérive et d'autoriser une récupération du véhicule. Pour augmenter l'efficacité des LAA, il peut être envisagé de **réaménager le profil en travers** (réduction de la largeur des voies de circulation en rapprochant les lignes de rive de la ligne axiale) et d'ainsi augmenter les possibilités de récupération offertes aux conducteurs.

On notera que **les LAA par engravures consomment une part importante du profil en travers** (au moins 30 cm par rive, soit 60 cm au total pour une installation en rive), ce qui les destine aux routes bidirectionnelles les plus larges.

Les LAA peuvent également être installées pour **influencer les trajectoires des conducteurs attentifs**, notamment celles qui peuvent être dangereuses (p. ex. dissuader ou réduire les intrusions de poids-lourds sur BAU via engravures en complément des marquages sonores installés sur la ligne de marquage).

Sur route bidirectionnelle, Anelli et Violette (2014) [3] préconisent l'installation des **LAA en rive**, en particulier **dans les sections rectilignes et dans les sections à grand rayon de courbure**, et recommandent une installation complémentaire en axe pour les routes bidirectionnelles mono déversées, qui représentent un risque accru de collisions frontales.

L'installation de LAA en courbe peut également **dissuader les conducteurs de couper un virage**. De même, dans les virages à faible rayon de courbure, l'installation de LAA constitue une aide supplémentaire pour le conducteur (estimer sa position latérale sur la chaussée et indiquer la nécessité de corriger sa trajectoire).

4.3.2 La question des cyclistes et deux-roues motorisés

Bien que l'impact exact des bandes rugueuses sur les accidents de vélo soit inconnu, il apparaît que les bandes rugueuses peuvent avoir un impact négatif sur le confort et la stabilité des cyclistes si des mesures adéquates ne sont pas envisagées [13].

Les gestionnaires routiers peuvent tenir compte des cyclistes de plusieurs façons: soit ne pas installer de bandes rugueuses sur des routes empruntées par de nombreux cyclistes ou, si la chaussée supporte une voie cyclable dédiée, soit ajuster les exigences minimales en matière de largeur d'accotement ou de dégagement latéral et/ou prévoir des interruptions des bandes rugueuses à intervalles réguliers, ou encore ajuster leur placement ou leurs dimensions.

Plus concrètement, un guide de l'AASHTO (2012) [14] indique que les bandes rugueuses ne sont pas recommandées lorsque les accotements sont utilisés par les cyclistes, à moins qu'il n'y ait:

- un minimum de 0,3 m de déport entre la voie de circulation et la bande rugueuse;
- un dégagement latéral de 1,2 m de la bande rugueuse au bord extérieur de l'accotement;
- ou
- 1,5 m jusqu'à un éventuel garde-corps, trottoir ou tout autre obstacle.

Si les circonstances locales ne permettent pas le dégagement latéral minimum souhaité, AASHTO indique que la longueur de la bande rugueuse peut être diminuée ou d'autres solutions appropriées envisagées.

La pratique la plus courante pour fournir un espace suffisant aux cyclistes consiste à localiser les bandes rugueuses au niveau du marquage plutôt qu'en accotement. Ce traitement peut en outre prolonger la durée de vie du marquage et le rendre plus visible par temps humide - en particulier dans des conditions d'obscurité (utilisation plus avantageuse des propriétés optiques du marquage suite à la variation du relief).



Figure 13 – Bandes de rive en accotement vs bandes associées au marquage

suffisamment large, consiste à réduire la longueur des bandes rugueuses à 30 cm (12") ou 20 cm (8"), voire parfois 15 cm (6") lorsque cela est nécessaire. La réduction de la profondeur de la bande rugueuse peut également réduire l'effet déstabilisant si un cycliste a besoin de traverser les bandes rugueuses. Attention toutefois que la réduction des dimensions peut réduire considérablement l'efficacité de la bande rugueuse pour les automobilistes.

Une autre pratique courante consiste à prévoir, à espace régulier (tous les 12 m ou 18 m), des interruptions (de 3 m à 3,6 m de longueur) dans les bandes rugueuses de rive pour permettre aux cyclistes de se déplacer entre la voie et l'accotement sans traverser une bande rugueuse. Cela a bien entendu une influence sur le son produit.

Une étape supplémentaire qui peut fournir un espace de manœuvre indispensable pour un cycliste où l'accotement n'est pas

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

Selon Anelli et Violette (2014) [3], peu d'études ont été publiées pour évaluer la perception des LAA et leur impact sur les **usagers des deux-roues motorisés (2RM) et vélos**. Les rares études disponibles concernant l'impact des LAA sur le contrôle des 2RM et des vélos ne montrent pas de dangerosité particulière, bien que le retour des expériences internationales souligne la nécessité de conserver des voies de circulation assez larges pour les cyclistes et d'aménager des interruptions dans les LAA.

Dans le cadre du projet *Roadsense*, les LAA du type engravures testées en ligne droite dans de bonnes conditions météo et une chaussée sèche n'ont pas posé de problèmes de contrôle aux motocyclistes essayeurs lors d'essais programmés en manœuvres longitudinale et transversale à différentes vitesses. Les manœuvres longitudinales montrent des vibrations importantes s'atténuant avec la vitesse, mais pas de sentiment de danger (vitesse maximale testée = 90 km/h). Les manœuvres transversales ne déstabilisent pas la moto quelle que soit la vitesse (vitesse maximale testée = 90 km/h) et ne provoquent pas de sentiment de danger chez les motocyclistes. Des tests complémentaires sont nécessaires pour évaluer plus précisément les effets possibles des LAA sur les 2RM en courbe.

4.3.3 La question du revêtement

De nombreuses variables liées au revêtement jouent un rôle important dans le succès de la mise en œuvre de bandes rugueuses fraisées, à savoir, l'âge, le type, l'épaisseur, l'emplacement des joints longitudinaux et le type d'équipement de fraisage utilisé pour l'installation [15].

Il semble n'y avoir peu ou pas de détérioration accélérée suite au fraisage du revêtement en asphalte ou en béton lorsque celui-ci est dans un bon état initial. Par contre, sur les chaussées anciennes qui montrent un degré élevé de déformation ou de fissuration, le fraisage peut exacerber les problèmes existants.

En pratique, l'**épaisseur de la couche** dans laquelle sont fraisées les bandes rugueuses doit dépasser la profondeur de la bande rugueuse, de sorte que les couches sous-jacentes ne soient pas exposées, ce qui permettrait à l'eau de s'infiltrer et compromettrait potentiellement l'intégrité du revêtement. L'épaisseur minimale requise aux Etats-Unis varie de 3,8 cm (1,5") pour les très jeunes revêtements à 6,4 cm (2,5") pour les revêtements plus âgés. Un enduisage devrait être réalisé en cas de fraisage dans des couches plus minces.

Les **joints longitudinaux** sont des points faibles inhérents à la chaussée, mais en raison des pratiques de construction, ils correspondent souvent à l'endroit idéal pour les bandes rugueuses. Bien que les praticiens aient constaté que, généralement, les joints longitudinaux en assez bon état peuvent supporter des bandes rugueuses fraisées sans accélérer la détérioration du revêtement [15], diverses pratiques sont utilisées pour éviter de fraiser les bandes rugueuses directement dans le joint longitudinal, comme fraiser deux bandes rugueuses plus petites de chaque côté du joint, déporter la bande rugueuse d'un côté ou de l'autre du joint (typiquement 10 cm), ou déplacer le joint longitudinal (en cas de pose d'une nouvelle couche de roulement).

Les bandes rugueuses fraisées ne nécessitent généralement pas ou peu d'**entretien**. L'expérience a montré que le flux de circulation à proximité de la bande rugueuse (déplacement d'air) prévient l'accumulation d'eau, de neige, de glace ou de sable dans celle-ci [12]. L'application d'une émulsion de bitume (*asphalt fog seal*) peut être envisagée là où des dégradations sont constatées, pour réduire l'oxydation et la pénétration de l'humidité. Par contre, les bandes rugueuses surélevées nécessitent un entretien, en particulier celles qui font usage de produits pouvant se détacher de la chaussée au fil du temps.

4.3.4 La question des nuisances sonores pour les riverains

Pour réduire au minimum les effets néfastes des bandes rugueuses sur les riverains, il est recommandé qu'à proximité des zones résidentielles, les modèles de bande rugueuse soient sélectionnés pour générer entre 6 à 12 dBA au-delà du niveau de bruit ambiant dans le véhicule, plutôt que de choisir des bandes rugueuses plus agressives. Il est par ailleurs recommandé de mettre fin aux bandes rugueuses 200 m avant les zones résidentielles/urbaines. A cette distance, l'effet du bruit est, selon la littérature, tolérable pour les riverains proches; à 500 m, il est négligeable.

Le déport (éloignement par rapport à la voie circulée) des bandes rugueuses de rive est une pratique courante sur les sections où le bruit est un problème et cela bien que les bandes rugueuses associées au marquage offrent une meilleure visibilité nocturne par temps de pluie qu'une bande de rive en accotement.

La mise en place de bandes rugueuses dans les zones de dépassement se traduit par une augmentation du bruit suite aux manœuvres de dépassement. Toutefois, les premières expériences sans bandes rugueuses dans les zones de dépassement ont rapidement mis en évidence qu'une application continue était nécessaire en termes de sécurité. Les collisions frontales et latérales entre trafic de sens opposés sont bien entendu susceptibles de se produire tant au niveau des zones de dépassement qu'au niveau des zones où il est interdit.

En 2012, une recherche documentaire et la consultation des départements de transport américains et d'autres experts ont confirmé qu'il manquait des recherches récentes analysant à la fois les niveaux de bruit extérieurs et intérieurs générés par les bandes rugueuses [16]. La littérature existante indique que des bandes rugueuses fraisées augmentent les niveaux de bruit externe de 5 à 19 décibels, et les niveaux de bruit à l'intérieur des véhicules de 5 à 15 décibels. Les recherches disponibles montrent que l'augmentation de la profondeur, de la largeur et de la longueur de la bande augmente le bruit intérieur et les vibrations, à l'inverse de l'espacement. En outre, des modèles de bandes rugueuses plus agressifs sont nécessaires lorsque la rugosité de la surface de la chaussée et la vitesse des véhicules augmentent, car dans ce cas, le bruit ambiant à l'intérieur du véhicule est plus élevé.

L'augmentation du bruit dans l'environnement est donc largement dépendante de l'intervalle entre les marques fraisées. Selon une étude finlandaise [17], un intervalle de 60 cm fournit les meilleurs résultats.

Diverses études (certaines européennes) ont expérimenté des bandes rugueuses à profil sinusoïdal (figure 14) qui semblent fournir des niveaux sonores d'alerte suffisants, tout en réduisant le bruit externe. Une étude pilote a été menée par le Danish Road Institute [18] pour tester cinq types de bandes rugueuses générant de faibles niveaux de bruit dans l'environnement; le bruit externe a été mesuré à 25 m de la route (à deux voies). Il s'est avéré que des indentations sinusoïdales conduisaient à une augmentation de seulement 0,5 à 1 dBA du niveau de bruit, des bandes cylindriques à une augmentation de 2 à 3 dBA et des indentations rectangulaires à 3 à 7 dBA de plus que les bandes sinusoïdales et 2 à 5 dBA de plus que les indentations cylindriques.

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

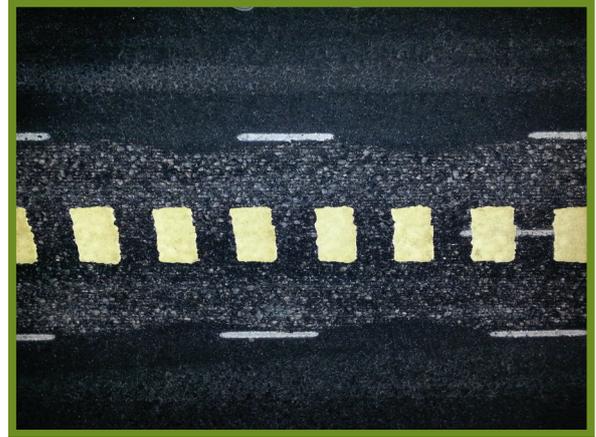


Figure 14 – Bandes rugueuses à profil sinusoïdal à l'approche et à l'intérieur d'un tunnel en Norvège (photos CRR)

Quelle que soit sa nature, l'installation d'une LAA doit être compatible avec le risque d'augmentation du bruit routier. Son exposition au passage des roues est en effet susceptible de produire une forte émergence acoustique (environ 10 dBA). A proximité de zones bâties, l'acceptabilité du dispositif dépendra de sa fréquence de roulage par le trafic. Si la fréquence d'activation du dispositif est faible (< 10-20 passages par heure), il est possible de l'installer, même à proximité d'une zone bâtie, sans nuisance excessive pour les riverains.

Dans le cadre de ses activités de normalisation au sein du groupe de travail CEN/TC226/WG2 «Marquages routiers», le CRR est occupé à développer une méthode pour évaluer le niveau de nuisance sonore des marquages en relief (voir encadré).

Méthode pour l'évaluation du niveau de nuisance sonore des marquages en relief

Un projet de méthode, basé sur la méthode en champ proche (*Close Proximity*), a été décrit et validé par deux essais croisés [19]. L'AWV s'est servie de cette méthode pour évaluer des marquages en relief typiques sur les autoroutes flamandes. La méthode doit être publiée sous la forme d'une CEN/TS (*Technical Specification*) dans le courant de l'année 2020, après la résolution des derniers problèmes.

La méthode en champ proche (*Close Proximity*)

La méthode *Close Proximity* est une méthode normalisée et assez couramment utilisée pour l'évaluation de la qualité acoustique des chaussées. La méthode elle-même a récemment été publiée en tant que norme ISO [20] avec une ISO/TS décrivant les pneus de mesure [21] et une ISO/TS décrivant les corrections de température, qui dépendent malheureusement non seulement du pneu de référence, mais aussi du type de chaussée [22]. La méthode révisée est jugée plus solide et reproductible. La méthode consiste essentiellement à faire rouler un pneu standard sur le revêtement et à mesurer le bruit pneu/chaussée avec deux microphones placés à deux positions standard. Cinq positions du microphone sont décrites, mais seules deux sont «obligatoires» (figure 15).

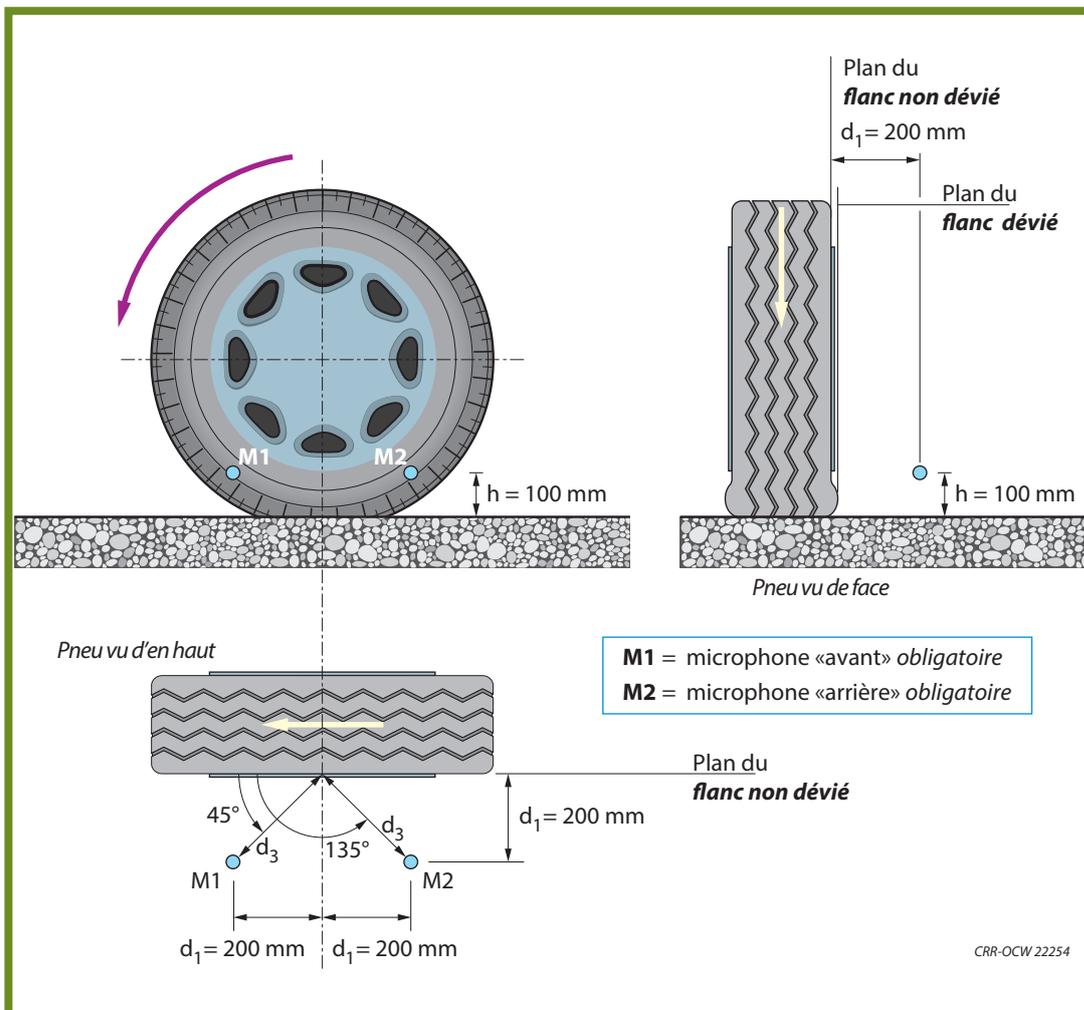


Figure 15 – Positions des microphones pour la méthode CPX

La figure 16 montre des images de la remorque CPX du CRR. L'intérieur du capot est recouvert d'un matériau absorbant le son (voir photo du milieu). Les deux microphones des positions M1 et M2 sont placés du côté intérieur du pneu; il s'agit des deux sphères noires (protection pare-vent) juste au-dessus de la chaussée sur la photo de gauche.



Figure 16 – Remorque CPX (type fermé) du Centre de recherches routières

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

Adaptation de la méthode de mesure sur les marquages en relief

Bien que destinée à l'évaluation des revêtements, la méthode CPX permet également de mesurer le bruit des marquages structurés, moyennant quelques adaptations mineures. Les modifications suivantes ont été proposées:

- n'utiliser que le *Standard Reference Test Tyre* (SRTT) P1 [23] qui représente un pneu de voiture particulière;
- mesurer à une vitesse constante de 80 km/h \pm 4 km/h, bien qu'il y ait encore quelques discussions à ce sujet et que d'autres vitesses de référence, telles que 50 km/h, seront probablement autorisées également;
- la section d'essai ne doit pas comporter de virages;
- l'opérateur doit s'assurer que le pneu d'essai roule à 100 % sur le marquage; pour ce faire, on peut équiper le véhicule d'un dispositif auxiliaire, comme une caméra qui filme le pneu d'essai pendant qu'il roule, et – dans le cas d'une remorque CPX fermée – un éclairage approprié sous le couvercle de la remorque est nécessaire. Au moins deux essais sur la même section expérimentale doivent être effectués;
- démarrage/arrêt de la mesure aux mêmes endroits;
- «l'Indice acoustique *Close-Proximity* pour les voitures particulières et le trafic léger» (CPXP) doit être déterminé conformément à [22]. Il s'agit d'un indice permettant de comparer les revêtements routiers, qui est basé sur les niveaux de pression acoustique pneu/revêtement – dans le cas présent – d'un pneu représentatif d'un pneu de voiture particulière (indiqué par P1);
- il faut mesurer à chaque essai le niveau de pression acoustique (SPL) avec la pondération de fréquence A et la pondération de temps «FAST»;
- le spectre de la bande de tiers d'octave devrait également être mesuré;
- les mesures doivent être effectuées par temps sec et à une température de l'air comprise dans l'intervalle [15 °C à 25 °C].

La figure 17 montre les modifications apportées à la remorque CPX de l'*Agentschap Wegen en Verkeer*. Une caméra CCD avec éclairage LED intégré a été fixée au-dessus du flanc arrière du pneu de mesure. Le signal de la caméra est transmis via un câble vidéo à un écran plat placé devant le pare-brise, ce qui permet au conducteur et au copilote de surveiller facilement la position du pneu d'essai par rapport au marquage routier (une ligne de 30 cm de large). Le conducteur est concentré sur la conduite du véhicule en toute sécurité pendant que le copilote commence/arrête la mesure au bon moment et surveille la position du pneu d'essai sur l'écran en demandant au conducteur d'adapter la position latérale du véhicule si nécessaire.



Figure 17 – Une remorque CPX modifiée pour mesurer les marquages en relief (à gauche et au milieu) et réalisation des mesures (à droite)

Validation de la méthode d'essai

Des essais préliminaires avec cette méthode ont été effectués en 2014 par l'Agentschap Wegen en Verkeer et par le BASt. En 2015, un premier essai croisé a été effectué sur un circuit d'essai fermé avec sept lignes de sept types différents de marquages en relief et une «ligne» sans marquage de référence, chaque ligne mesurant 100 m de long et 0,3 m de large (figure 18).



Figure 18 – La remorque CPX du CRR effectuant des mesures sur les marquages routiers de la zone d'essai de Geilenkirchen

La zone d'essai est située sur la base aérienne de l'OTAN à Geilenkirchen, en Allemagne. Le résultat d'un deuxième essai croisé, effectué en 2016 par le CRR, l'AWV et le BASt, est présenté à la figure 19.

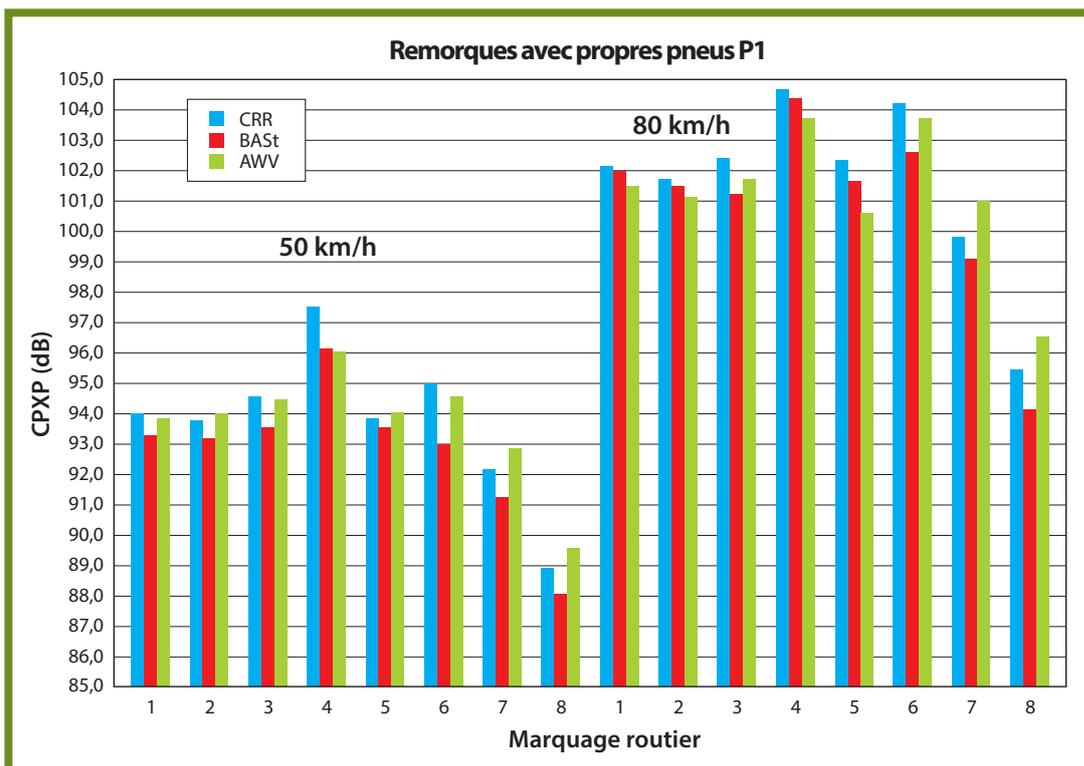


Figure 19 – Valeurs CPXP obtenues avec les remorques du CRR, du BASt et de l'AWV, équipées de pneus SRTT sur les 8 lignes de Geilenkirchen, à deux vitesses (50 et 80 km/h)

Les expériences respectives ont démontré que la méthode est faisable. La répétabilité sur des sections d'essai aussi courtes que 40 m est comprise entre 0,2 et 0,7 dB (écart type) et deux passages suffisent. Une largeur de 0,3 m est recommandée afin de maintenir le pneu d'essai confortablement sur la ligne de marquage, mais cette donnée fait également l'objet de discussions.

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

La reproductibilité sur des tronçons de 100 m obtenus par trois participants avec deux passages par section était de 0,59 dB si les participants n'utilisaient que leur propre pneu P1 et de 0,85 dB s'ils échangeaient également les pneus entre eux.

L'influence de la température sur les résultats de ce type de mesures n'a pas encore été étudiée; pour l'instant, il est recommandé d'effectuer des mesures à des températures de l'air proches de la température de référence.

Propriétés acoustiques de certains marquages en relief utilisés sur les autoroutes flamandes [23]

Une sélection de 23 sections de marquages routiers a été réalisée, dont des marquages pointillés (avec des points de tailles et de formes différentes), à barrettes (plastique à froid et thermoplastique) et du ruban structuré. Une sélection des marquages routiers mesurés est présentée à la figure 20. Tous les tronçons sont des lignes ininterrompues d'une largeur de 30 cm (lignes de bordure sur les autoroutes). La longueur des sections d'essai varie entre 40 m et 380 m et sur chacune d'elles, deux ou trois passages ont été effectués. Certains échantillons ont été choisis sur la même ligne de bordure, à proximité les uns des autres et là où le même produit a été appliqué. On peut s'attendre à des résultats similaires.

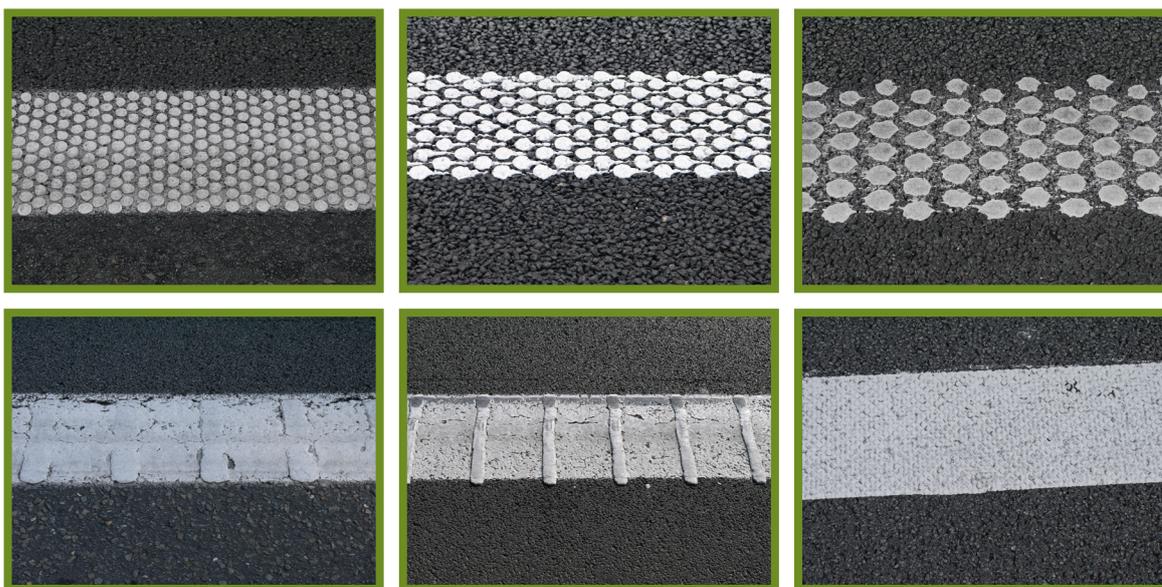


Figure 20 – Quelques marquages en relief testés: avec des points (rangée supérieure), des barrettes (rangée inférieure, gauche et centrale) et du ruban à motif losange (rangée inférieure, côté droit)

A titre de comparaison, quatre sections avec des revêtements de chaussée en asphalte de type commun ont également été mesurées. Deux sections en SMA 0/10 et deux en béton bitumineux dense (granulométrie inconnue). Les niveaux CPXP mesurés sont illustrés à la figure 21.

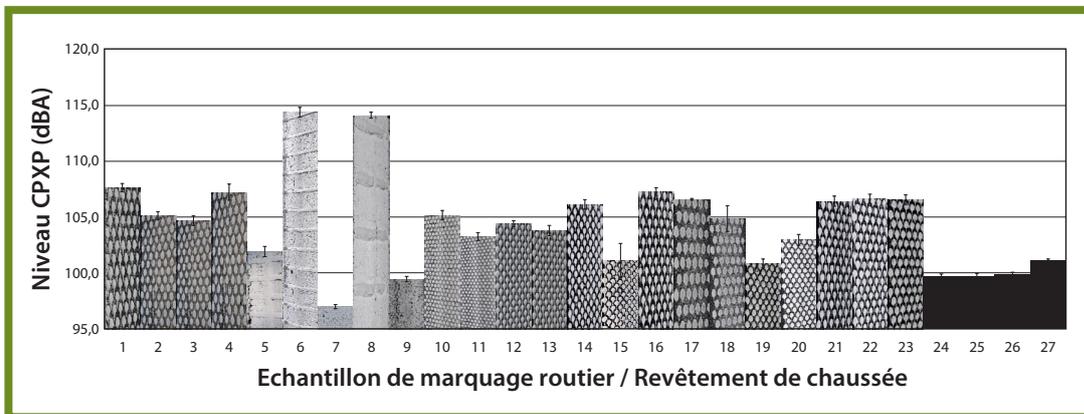


Figure 21 – Niveaux CPXP mesurés sur les marquages en relief en Belgique (et quelques autres) et sur les revêtements autoroutiers communs (échantillons 24-27)

Ces résultats permettent de tirer les conclusions suivantes:

- les marquages à barrettes sont les plus bruyants mesurés (échantillons 6 et 8), du moins pour les échantillons où les barrettes étaient très prononcées et non aplaties par l'usure. Ces marquages à barrettes usés étaient au contraire parmi les plus silencieux. Ce n'est pas une surprise, car les barrettes prononcées représentent la texture de la gamme «mégatexture» qui produit efficacement les vibrations des pneus. Les deux échantillons avec des barrettes prononcées donnent, bien que mesurés à un endroit différent, environ le même niveau CPXP, soit environ 14 dB(A) de plus (!) que le niveau CPXP sur les surfaces de référence (échantillons 24 à 27);
- le ruban (échantillon 7) est le marquage le plus silencieux mesuré et est encore plus silencieux que la surface de référence;
- la peinture (échantillon 9) reproduit la même texture que la surface de la route et c'est l'explication logique pour laquelle elle reproduit le même niveau de bruit que les revêtements de chaussée de référence (échantillons 24 à 27);
- les niveaux sonores des marquages en pointillés varient approximativement entre 101 et 107 dB(A), ce qui correspond à une augmentation du bruit entre 1 et 7 dB(A). Les points ronds ne sont pas plus silencieux que les points en forme de gouttes, et la taille des points ne semble pas jouer un rôle;
- les résultats de mesure provenant de marquages appartenant au même lot, tels que les échantillons 2 et 3; 10 et 11; 12 et 13; 14, 15 et 16; 17 et 18; 21, 22 et 23, diffèrent jusqu'à 2 dB(A), mais souvent moins. L'échantillon 15 constitue une exception. Il est beaucoup plus silencieux que les échantillons 14 et 16, mais ceci est dû à une inhomogénéité locale qui a été remarquée par l'opérateur et qui a conduit à un écart type plus élevé. C'était également le cas, dans une moindre mesure, pour l'échantillon 18.

Conclusions

Une méthode basée sur la méthode CPX a été développée pour mesurer la qualité acoustique (pour l'environnement) des marquages routiers. Celle-ci possède une bonne répétabilité et peut être exécutée rapidement. Il est attendu que le CEN publie la méthode comme *Technical Specification* au cours de l'année 2020. L'application de la méthode sur certains marquages en relief utilisés sur les autoroutes flamandes montre qu'il existe de grandes différences en termes de caractéristiques acoustiques. Certains marquages sont à peine plus bruyants que le revêtement de référence (tapis), d'autres types produisent une émission sonore modérée à significative lors du passage (marquages par points et en splash). Les nouveaux marquages en saillie sont extrêmement bruyants lors du passage.

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

4.3.5 Éléments de coût et bénéfices

L'installation d'une LAA semble surtout efficace en ligne droite pour prévenir des sorties de voie involontaires. Leur installation en virage contribue toutefois à améliorer la trajectoire prise volontairement par les usagers.

La réalisation de LAA représente, a priori, un coût économique faible comparé à la valeur du patrimoine routier correspondant, et surtout aux économies matérielles et sociétales attendues. Cependant, généralisées à un itinéraire, les LAA représentent un budget conséquent, qu'il conviendra d'articuler de façon cohérente avec la programmation des travaux d'entretien routier.

L'installation de marquages sonores est de nature à réduire les dommages matériels causés au domaine public (coûts de maintenance des dispositifs de retenue moindres suite à la diminution de la fréquence des collisions et de leur gravité). En termes sociétaux, elles constituent un dispositif rentable dès la première année si elles parviennent à sauver une vie.

► 5 Aide à la décision

Les critères déterminant le choix de la ligne d'alerte audiotactile à installer (ou pas) sont nombreux:

- **type d'accident/de risque:** accidents associés à une sortie de voie involontaire non liée à la vitesse (hypovigilance, inattention), collisions frontales ou latérales, autres;
- **trafic:** trafic journalier moyen, vitesse, cible accidentologique;
- **type de route:** chaussée unique bidirectionnelle, chaussée à voies séparées;
- **environnement de la route:** rural sans habitation/habitation isolée/agglomération urbain, ponts;
- **section transversale:** largeur chaussée/nombre de voies, accotement (revêtu/largeur), aménagement cyclables (présence/type/largeur), zone de dépassement;
- **section longitudinale et tracé:** accès riverains, intersections, sinuosité/courbes, tourne à droite/à gauche;
- **usagers:** cyclistes (présence), PL (présence), voitures (trajectoire);
- **revêtement et marquage:** état du revêtement, épaisseur du revêtement, type et largeur marquage, présence d'un joint longitudinal, de joints transversaux;
- **exploitation:** déneigement (fréquence, type d'équipement).

Une aide à la décision est présentée ci-après.

5.1 Types de dispositifs disponibles

Remarque: vu leurs caractéristiques (hauteur limitée et type de motif), les marquages routiers texturés habituellement utilisés pour améliorer la visibilité de nuit par temps de pluie ne peuvent être considérés comme des lignes d'alerte audiotactiles. Ils ne donnent en effet pas lieu à une émergence sonore (et vibratoire) à hauteur des dispositifs décrits ci-après.

5.1.1 Engravures

a. Caractéristiques

Les LAA de type engravures sont très répandues en Amérique du Nord. On y distingue deux principaux types:

- les engravures supposées générer 10 à 15 dBA (au-delà du niveau de bruit ambiant) dans le véhicule (type VL);
- les engravures supposées générer 6 à 12 dBA.

Elles sont respectivement caractérisées par les dimensions suivantes:

- *engravure Type US_10/15 dBA:*
 - largeur: 18 cm;
 - espacement: 30,5 cm;



L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

- profondeur: 13 mm;
- longueur: 30,5 cm à 40 cm;
- les déports les plus courants, par rapport au marquage de rive, sont de 15 cm et 30,5 cm.

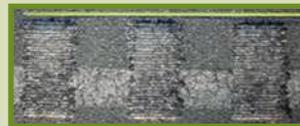
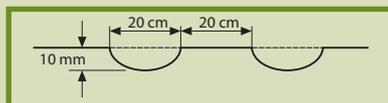
- *engravure Type US_6/12 dBA:*
 - largeur: 13 cm;
 - espacement: 28 à 30,5 cm;
 - profondeur: 10 mm;
 - longueur: 30,5 cm à 40 cm (*voire 15 cm pour fournir un dégagement latéral supplémentaire pour les cyclistes ou simplement les installer sur les routes avec des accotements étroits ou inexistantes*).

Les résultats du projet *Roadsense* indiquent quant à eux que les engravures:

- induisent de fortes émergences sonores (entre 10 et 20 dBA pour les VL et VU, environ 6 dBA pour les PL);
- présentent les émergences vibratoires les plus importantes (bien entendu variables selon le type de véhicule, i.e. très significatives pour les VL, relativement faibles pour les PL). Toutefois, les vibrations n'influent pas sur le temps de réaction. Elles peuvent par contre permettre une meilleure reconnaissance de l'évènement.

Pour optimiser le temps de réaction à une alarme sonore lorsque la personne est en train d'effectuer une tâche lui demandant de l'attention, il est préférable que celle-ci ait un niveau sonore élevé, avec une fréquence plutôt élevée. La fréquence fondamentale d'un son produit par une série de bandes audiotactiles étant fortement dépendante du pas entre les dispositifs (plus le pas est resserré entre deux bandes consécutives, plus la fréquence fondamentale est élevée), le projet *Roadsense* a abouti à sélectionner les motifs suivants:

- *engravure «optimisée» Roadsense:*
 - largeur: 20 cm;
 - longueur du motif élémentaire: 40 cm;
 - profondeur: 10 mm;
 - longueur: 30/35 cm.



- *engravure «optimisée» Roadsense:*
 - largeur: 20 cm;
 - longueur du motif élémentaire: 1 m;
 - profondeur: 10 mm;
 - longueur: 30/35 cm.



b. Exécution

Les engravures peuvent être réalisées par fraisage mécanique de la chaussée à l'aide d'une fraiseuse utilisée généralement pour les travaux de finition ou de reprise des joints des couches de roulement (type W 35 DC [24]). Ce type d'équipement compact ne dispose ni d'un odomètre, ni d'un dispositif d'aspiration. Cela nécessite donc, d'une part, la présence d'une balayeuse aspiratrice, et d'autre part, un prémarquage manuel et un double filet de prémarquage.

c. Coût

Le coût de réalisation des engravures dépend directement de leurs dimensions et espacement (temps d'exécution, volume de fraisat). La réalisation d'une ligne d'alerte de 40 mètres linéaires par engravures nécessite un temps d'exécution compris entre 20 et 40 minutes. Les essais de mise en œuvre de lignes d'alerte par engravures montrent que les dispositifs techniquement les plus faisables sont les engravures qui mesurent 20 cm de long, 35 cm de large et 1,5 cm de profondeur et ont un espacement significatif (80 cm entre deux engravures, soit un motif élémentaire d'une longueur de $0,2 \text{ m} + 0,8 \text{ m} = 1,0 \text{ m}$); temps d'exécution de 20 minutes (1 500 m linéaires par jour).

5.1.2 Barrettes

a. Caractéristiques

S'agissant des barrettes, le projet *Roadsense* indique qu'elles:

- induisent de fortes émergences sonores (entre 10 et 20 dBA pour les VL et VU, environ 5 dBA pour les PL);
- présentent des émergences vibratoires importantes (bien qu'inférieures à celles causées par les engravures).

Il recommande, sur base du critère du temps de réaction, l'utilisation d'un espacement court (maximum 50 cm) entre les barrettes:

- *barrette «optimisée»* Roadsense:
 - longueur du motif élémentaire: 30 + 22 cm (alternativement);
 - épaisseur: 10 mm.



Des barrettes avec semelle ont également été mises en œuvre dans le cadre du projet *Roadsense* afin de conserver une meilleure longévité même en cas d'opération d'entretien hivernal.



L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

b. Exécution/Produit

Les marquages audiotactiles peuvent être réalisés à l'aide d'une petite machine auto-tractionnée de type Coremat [25] (équipée d'une boîte d'application à levage et ouverture hydrauliques, permettant de réaliser différents profils de barrettes, avec ou sans semelle) ou par une machine automotrice en extrusion sabot.

Un produit VNTP de marquage Sérac – enduit à froid méthacrylate à deux composants avec microbilles – peut être utilisé.

c. Coût

Coût de mise en œuvre: environ 5 €/m linéaire.

5.1.3 Spots

Les marquages de type «boutons» ou «spots» induisent des émergences sonores significativement plus faibles (12 dBA pour les VL, 4 dBA pour les PL). Ils présentent dès lors une alerte efficace des VL sous certaines conditions (spots de grandes dimensions, appliqués en rangées comme barrettes), mais pas pour les PL. Les spots sont en outre très faiblement perçus en vibration. Le projet *Roadsense* a abouti à recommander les caractéristiques suivantes:

- spots «optimisés» Roadsense:
 - 4 points par longueur;
 - pas entre 2 bandes: 10 cm + 10 cm;
 - épaisseur: 3 mm.



► 5.2 Questions permettant de guider le choix du concepteur ou gestionnaire

5.2.1 Question 1 – Installer des LAA sur un tronçon, ou pas?

Éléments décisionnels

a. Type d'accident/de risque sur le tronçon considéré

Remarque: les LAA sont principalement destinées à diminuer le nombre d'accidents associés à une sortie involontaire de voie par distraction, défaut de vigilance, somnolence, ainsi que ceux résultant de collisions frontales ou latérales entre véhicules circulant sur des voies de sens opposés.

- Section sujette à des accidents associés à une sortie involontaire de voie non liée à la vitesse (donc hors sorties avec perte de contrôle du véhicule à l'état initial)?

OUI → LAA – En rive

- Section sujette à des accidents de type collisions frontales ou impacts latéraux entre véhicules circulant sur des voies opposées?

OUI → LAA – En axe

- Section présentant un alignement horizontal rectiligne (ou de grands rayons de courbure) et une sollicitation visuelle faible (propices à l'hypovigilance et à l'inattention)?

OUI → LAA – En rive

- Route à chaussées séparées présentant un risque accru d'incursions sur la BAU?

OUI → LAA – En rive

- Routes bidirectionnelles (surtout si mono déversées) présentant un risque accru de collisions frontales?

OUI → LAA – En axe

- Section présentant des virages à faible rayon de courbure où les conducteurs sont tentés de couper un virage?

OUI → LAA – En rive ou en axe selon la situation

Attention: observer le comportement des usagers et évaluer si le nombre de passages sur le dispositif ne risque pas de provoquer trop de nuisances sonores (maximum 10 à 20 passages par heure).

- Section présentant des virages et donnant lieu au passage de nombreux 2RM?

OUI → Eviter le placement de LAA en axe

Attention: l'effet des LAA en axe sur la sécurité des 2RM n'a pas été évalué.

b. Environnement

Remarque: l'avertissement sonore produit par les LAA à l'intérieur du véhicule s'accompagne d'une augmentation du niveau sonore à proximité de la route. Une attention particulière doit donc être portée vis-à-vis des éventuels riverains.

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

- Le tronçon considéré traverse-t-il une zone urbanisée/habitée, voire passe-t-il à proximité d'une habitation isolée?

OUI → Pas de LAA sur le tronçon ou arrêt des LAA à (au moins) 200 m de cette zone/habitation

c. Trafic (TJM)

Remarque: critère uniquement utile si besoin d'identifier des sections prioritaires en cas d'installation à l'échelle du réseau.

- Le TJM justifie-t-il l'installation d'un dispositif prévenant les sorties involontaires de voie (p. ex. minimum 500 véhicules par jour)?

OUI → LAA

d. Trafic (vitesse)

Remarque: ce critère considère le niveau de gravité associé à la vitesse en cas de collision.

- La limitation de vitesse ou la vitesse pratiquée (V85) justifie-t-elle l'installation d'un dispositif prévenant les sorties involontaires de voie?

 $V \leq 50$ km/h → Pas de LAA

5.2.2 Question 2 – Quel type de LAA installer (engravures, barrettes, spots)?

Eléments décisionnels

a. Cible accidentologique

Remarque: l'émergence sonore du dispositif LAA (par rapport au bruit de fond à l'intérieur du véhicule) est variable selon le type de LAA et le type de véhicule. Bien que les émergences sonores soient, pour tous les types de LAA, significativement plus faibles dans les PL, certaines LAA sont plus émergentes que d'autres. Il convient donc de les sélectionner en considérant la cible accidentologique.

- Les poids-lourds sont-ils la cible?

OUI → LAA type barrettes ou engravures (choix déterminé par les autres paramètres)
- Les véhicules légers sont-ils la cible?

OUI → LAA type spots, barrettes ou engravures (choix déterminé par les autres paramètres)

b. Section transversale

Remarque: bien entendu, la présence d'une zone de récupération (accotement revêtu ou stabilisé) augmente les chances de l'usager de pouvoir retourner sur la voie de circulation sans perdre le contrôle du véhicule. Placée dans la voie de circulation (à l'intérieur de la ligne de marquage de rive), une LAA est toutefois à même d'alerter l'usager dont la trajectoire dérive et d'autoriser une récupération du véhicule. Pour augmenter l'efficacité des LAA, il peut être envisagé de réaménager le profil en travers (réduction de la largeur des voies de circulation en rapprochant les lignes de rive de la ligne axiale) et d'ainsi augmenter les possibilités de récupération offertes aux conducteurs.

Selon l'endroit où sont installées les LAA, on veillera à adapter leur couleur (p. ex. barrettes blanches si associées au marquage, noires si posées hors marquage; pose d'un marquage après fraisage des engravures si elles y sont associées).

On notera également que les LAA par engravures consomment une part importante du profil en travers (30 cm par rive, soit 60 cm au total pour une installation en rive), ce qui les destine aux routes bidirectionnelles les plus larges.

- Le tronçon est pourvu d'une BAU ou d'un accotement praticable d'une largeur suffisante pour permettre une récupération de trajectoire (p. ex. minimum 1 m) ...

... ET cet accotement n'est pas emprunté régulièrement par des cyclistes?

OUI → Tous les types de LAA sont envisageables, en association avec le marquage ou posées à l'extérieur du marquage (choix déterminé par les autres paramètres)

... ET cet accotement est emprunté régulièrement par des cyclistes?

Si un espace libre de 1,2 m reste disponible pour les cyclistes

→ Tous les types de LAA sont envisageables, en association avec le marquage ou posées à l'extérieur du marquage (choix déterminé par les autres paramètres).

Si NON → Seules les LAA en association avec le marquage sont envisageables: spots, barrettes, engravures sur marquage (choix déterminé par les autres paramètres; conserver au moins 1 m d'espace libre).

ALTERNATIVE: engravures moins longues (p. ex. 20 cm) et interrompues, tous les 12 m à 18 m, sur une longueur de 3 m à 4 m (espace libre de minimum 1,2 m) pour permettre leur traversée sans inconfort.

- Le tronçon n'est pas pourvu d'une BAU ou d'un accotement praticable d'une largeur suffisante pour permettre une récupération de trajectoire?

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

→ Seules les LAA en association avec le marquage sont envisageables: spots, barrettes, engravures sur marquage (choix déterminé par les autres paramètres)

Attention: observer le comportement des usagers et évaluer si le nombre de passages sur le dispositif ne risque pas de provoquer trop de nuisances sonores (maximum 10 à 20 passages par heure) – A priori, cette pratique ne sera possible que pour des chaussées où la voie de circulation est d'au moins 3 m. Il est en outre possible que cette mesure conduira à un léger décalage du trafic vers la gauche de la voie.

- Le tronçon ne présente aucun accotement à l'extérieur du marquage?

→ Placement de LAA du type barrettes noires (couleur revêtement) à l'intérieur de la voie de circulation

Attention: observer le comportement des usagers et évaluer si le nombre de passages sur le dispositif ne risque pas de provoquer trop de nuisances sonores (maximum 10 à 20 passages par heure). A priori, cette pratique ne sera possible que pour des chaussées où la voie de circulation est d'au moins 3,5 m. Il est en outre probable que cette mesure conduira à un léger décalage du trafic vers la gauche de la voie.

c. Revêtement

Remarque: l'âge, le type et l'épaisseur du revêtement, ainsi que l'emplacement des joints longitudinaux jouent un rôle important dans le succès de la mise en œuvre de LAA de type engravure. Selon la littérature, il n'y a pas ou peu de détérioration accélérée suite au fraisage du revêtement en asphalte ou en béton lorsque celui-ci est dans un bon état initial. Par contre, sur les chaussées anciennes qui montrent un degré élevé de déformation ou de fissuration, le fraisage peut exacerber les problèmes existants.

Par ailleurs, l'épaisseur de la couche dans laquelle sont fraisées les LAA doit être suffisante, eu égard à la profondeur de l'engravure (pour ne pas exposer les couches sous-jacentes).

Les joints longitudinaux sont des points faibles inhérents à la chaussée, mais en raison des pratiques de construction, ils correspondent souvent à l'endroit idéal pour les LAA. Des mesures doivent être prises afin d'éviter d'accélérer la détérioration du revêtement via les joints.

- Le revêtement ne présente pas un bon état initial OU l'épaisseur de la couche superficielle est inférieure à la profondeur d'une engravure (typiquement 10 mm à 15 mm) OU un joint longitudinal est présent à l'endroit où doivent être placées les LAA?

→ La réalisation de LAA type engravure est impossible (sauf si une intervention est prévue au niveau du revêtement: pose d'une nouvelle couche de roulement, imperméabilisation des engravures, déport de l'engravure d'un côté ou de l'autre du joint - typiquement 10 cm). L'application d'une émulsion

de bitume (*asphalt fog seal*) peut être envisagée là où des dégradations sont constatées, pour réduire l'oxydation et la pénétration de l'humidité.

Attention: La littérature américaine suggère, dans le cas des engravures, une épaisseur minimum de 4 cm pour les très jeunes revêtements à 6 cm pour les revêtements plus âgés.

d. Entretien/comportement hivernal

Remarque: selon l'expérience américaine, les LAA fraisées ne nécessitent généralement pas ou peu d'entretien. L'expérience a montré que le flux de circulation à proximité du dispositif (déplacement d'air) prévient l'accumulation d'eau, de neige, de glace ou de sable dans celles-ci.

Les LAA surélevées doivent faire l'objet d'une attention, en particulier celles qui font usage de produits pouvant se détacher de la chaussée au fil du temps. La littérature américaine semble les limiter aux climats où le déneigement n'est pas une pratique courante (sans plus de précision).

- Le tronçon considéré donne lieu à de fréquentes opérations de déneigement en période hivernale ...

... ET les LAA sont implantées au droit du marquage ou à l'intérieur de la voie de circulation? → Les LAA de type barrettes sont déconseillées.

... ET les LAA sont implantées en accotement?

→ Les LAA de type barrettes sont envisageables. Une attention particulière doit toutefois être apportée lors des opérations de déneigement (déneigement des accotements, choix des lames d'usure).

Attention: ces recommandations pourraient être adaptées en fonction de prochains retours d'expérience. La pose d'une barrette avec semelle pourrait être une solution plus durable.

- Dans le cas contraire

→ LAA type spots, barrettes ou engravures (choix déterminé par les autres paramètres)

Attention: une attention particulière doit toutefois être apportée à l'éventuelle accumulation d'eau, de glace, de saleté dans l'engravure si celle-ci est installée loin du trafic.

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

5.2.3 Question 3 – Faut-il placer les LAA sur l'ensemble du tronçon?

Élément décisionnel

a. Environnement

Remarque: il est recommandé d'interrompre les LAA à hauteur de certains points/zones singuliers afin d'éviter certains effets secondaires (p. ex. détérioration du revêtement, bruit, etc.).

- Le tronçon comporte-t-il des intersections, bandes de tourne à gauche/droite, rampes de sortie/accès, ponts, zones où le dégagement latéral limite l'installation en accotement, zones résidentielles, joints en chaussée?

OUI → interruption des LAA à ces endroits

Attention: en particulier, arrêt des LAA à (au moins) 200 m du début d'une zone résidentielle ou habitation isolée. Cette contrainte peut être revue s'il s'avère que le nombre de passages sur les LAA est très faible. Le déport (éloignement par rapport à la voie circulée) des LAA de rive est notamment une pratique courante sur les sections où le bruit est un problème.

5.2.4 Question 4 – Quelles dimensions/Quels motifs choisir?

A ce jour, l'état de l'art recommande l'utilisation des dimensions et motifs présentés au § 5.1 Types de dispositifs disponibles. Le choix entre ces types dépendra notamment des paramètres bruit et présence éventuelle de cyclistes.

Éléments décisionnels

a. Le bruit pour les riverains

Pour réduire au minimum les effets néfastes des LAA sur les riverains, il est recommandé qu'à proximité des zones résidentielles, les modèles soient sélectionnés pour générer entre 6 à 12 dBA au-delà du niveau de bruit ambiant dans le véhicule, plutôt que de choisir des LAA plus agressives (10 à 15 dBA).

b. La présence éventuelle de cyclistes

Remarque: sur les routes où les cyclistes ne sont pas présents, comme sur les autoroutes, il est recommandé de sélectionner des motifs de LAA pouvant générer environ 10 à 15 dBA au-dessus du niveau de bruit ambiant dans le véhicule, mais pour les routes où des cyclistes peuvent être attendus, il est recommandé d'utiliser des motifs plus tolérants (inconfort limité en cas de passage sur les LAA) pour ces usagers et générant entre 6 à 12 dBA (au-delà du niveau de bruit ambiant dans le véhicule).

- Le tronçon traverse, à certains endroits, une zone résidentielle ou longe des habitations isolées, ou supporte le passage de nombreux cyclistes?

OUI → Préférer des LAA présentant une émergence sonore moins élevée (spots ou engravures moins larges et moins profondes – voir § 5.1 Types de dispositifs disponibles).

Attention: ces dispositifs pourraient s'avérer trop peu efficaces si les PL sont la cible.

NON → Sans autre contrainte, préférer des LAA présentant une émergence sonore élevée (barrettes ou engravures larges et profondes – voir § 5.1 Types de dispositifs disponibles).

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

► 6 Conclusions et perspectives

6.1 Conclusions générales

Les lignes d'alertes audiotactiles (engravures, barrettes ou spots), dont il est question dans ce document, sont principalement destinées à diminuer le nombre d'accidents associés à une sortie involontaire de voie par distraction, défaut de vigilance, somnolence, ainsi que celles résultant de collisions frontales ou latérales entre véhicules circulant sur des voies de sens opposés.

L'analyse des procès-verbaux relatifs aux accidents mortels survenus sur autoroute en 2014 et 2015 indique que la distraction et l'inattention sont les principales causes d'accidents (près de 30 % des cas). De manière plus générale, l'analyse du nombre d'accidents corporels survenus en 2017, selon le type de la première collision, indique que hors agglomération, 31 % d'entre eux n'impliquent qu'un seul usager (et 37 % sur autoroute) (VIAS, 2018) [26].

Les accidents par sortie involontaire de voie représentent donc un enjeu fort en termes de sécurité routière, et tel que démontré par la littérature, les lignes d'alerte audiotactiles ont fait leurs preuves dans d'autres parties du monde.

Leur utilisation en Belgique reste toutefois limitée, probablement du fait de l'absence de lignes directrices pratiques et de l'idée qu'elles s'accompagnent de problèmes tels que la pollution sonore, la gêne pour les deux-roues et des difficultés d'entretien. Nos cahiers des charges types n'incluent en outre pas l'ensemble de ces dispositifs. Les engravures ne sont pas prévues. Les dimensions et fréquence de pose prévues pour les barrettes ne sont pas, selon la littérature, optimales en termes d'émergence sonore. Enfin, si des marquages routiers texturés sont utilisés (habituellement pour améliorer la visibilité de nuit par temps de pluie), ils ne peuvent être considérés comme des lignes d'alerte audiotactiles. Leurs caractéristiques (hauteur limitée et type de motif) ne donnent en effet pas lieu à une émergence sonore (et vibratoire) à hauteur des dispositifs décrits dans ce document.

Une évolution des cahiers des charges types et l'élaboration de guides pratiques semblent donc nécessaires pour développer l'usage des lignes d'alertes audiotactiles. Le présent document apporte une première réponse à ce second besoin. Plusieurs questions restent toutefois encore insuffisamment explorées et devraient faire l'objet d'études complémentaires. La réalisation de chantiers pilotes pourrait en outre donner l'opportunité d'impliquer le secteur privé actif dans la construction routière (fabricants de produits, marqueurs, entreprises de voirie). Faute de règles claires, le marché apparaît en effet très peu développé et l'expérience de nos entrepreneurs à étendre.

La réflexion autour de l'usage des lignes d'alerte audiotactiles ouvre donc la porte à de nombreuses perspectives, sommairement listées ci-après.

6.2 Perspectives (études complémentaires, veille technologique, développement)

Bien que les lignes d'alerte audiotactiles soient utilisées de longue date outre-Atlantique, elles font encore l'objet d'études en vue de leur optimisation, notamment en France. Ces études, en laboratoire et sur site, n'ont pas encore permis d'apporter une réponse à l'ensemble des enjeux associés à ces dispositifs. Une veille technologique active, mais également la mise en place de chantiers pilotes semblent donc indispensables pour développer l'expertise du secteur, en particulier en abordant les questions suivantes (liste non exhaustive).

- **Sécurité routière:** ces dispositifs peuvent-ils effectivement induire une réduction du nombre de sorties involontaires de voie ou autres types d'accidents dans notre pays? Concourent-ils à une modération des vitesses pratiquées et à des positions appropriées sur la voie?
- **Durabilité:** ces dispositifs, en particulier ceux à relief positif, affichent-ils une bonne tenue dans le temps? Quels paramètres concourent à leur usure? Dans quelles circonstances les barrettes se détachent-elles (caractéristiques du revêtement, mode de pose, sollicitations, météo, position, entretien hivernal)?
- **Bruit:** les dispositifs que l'on sélectionnerait en Belgique produisent-ils une émergence sonore suffisante à l'intérieur des véhicules (VL, PL), sans causer trop de nuisances sonores dans l'environnement? Les recommandations de placement tirées de la littérature (à au moins 200 m de toute habitation, maximum 10 à 20 passages par heure sur les dispositifs) sont-elles appropriées?
- **Acceptabilité:** niveau d'acceptabilité des riverains (bruit, sécurité), des usagers (inconfort, sécurité), de la commune et du gestionnaire (exploitation, plaintes)?
- **Configuration des dispositifs:** (motif et position): comment les dimensions (hauteur, largeur, longueur), la position par rapport au marquage et le motif (en continu ou par bloc, espace entre barrettes) influencent-ils les quatre paramètres précédents? Peut-on adopter les recommandations issues de la littérature, compte tenu des caractéristiques de nos voiries?
- **Faisabilité et coûts:** quelles sont les contraintes techniques associées à l'exécution ou au placement de ce type de dispositif? Les équipements et produits sont-ils disponibles ou accessibles? L'expertise technique est-elle à renforcer? Quels sont les coûts y associés?

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

7 Bibliographie

1. **Elvik, R. & Vaa, T. (2004)**
The handbook of road safety measures.
Amsterdam : Elsevier. ISBN 0-08-044091-6.
2. **Torbic, D.J., Hutton, J.M., e.a. (2009)**
Guidance for the design and application of shoulder and centerline rumble strips.
Washington : Transportation Research Board (TRB). (National Cooperative Highway Research Program Report (NCHRP Report), 641). ISBN 978-0-309-11799-9.
3. **Anelli, P. & Violette, E. (2014)**
Roadsense : séminaire de cloture du projet et perspectives.
In : Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA), (2014)919. p. 101-106.
Paris : Editions RGRA.
4. **Federal Highway Administration (FHWA) (2019)**
Rumble strips and rumble stripes : general information.
Washington : FHWA. https://safety.fhwa.dot.gov/roadway_dept/pavement/rumble_strips/general-information.cfm
Dernière consultation le 04/06/2019.
5. **Rosey, F., Anelli, P. & Violette, E. (2011)**
Roadsense : prévention des sorties involontaires de voie par lignes d'alerte routières audio-tactile. Livrable 2.1, état de l'art sur les systèmes audio-tactiles existants.
Rouen : Centre d'études techniques de l'Équipement Normandie Centre (CETE Normandie Centre). Version provisoire 0.1.
6. **Service Public de Wallonie - Direction Générale Opérationnelle des Routes et des Bâtiments (2012, version 2016 consolidée)**
CCT Qualiroutes: cahier des charges-type. Catalogue des méthodes d'essai.
Namur : SPW-DG01.
7. **Vlaamse Overheid – Agentschap Wegen en Verkeer (AWV) (2014)**
Handboek vergevingsgezinde wegen.
Brussel : AWV. <https://docs.wegenenverkeer.be/Vademecums/Vademecum%20Vergevingsgezinde%20wegen.pdf>
Dernière consultation le 04/06/2019.
8. **Vlaamse Overheid – Agentschap Wegen en Verkeer (2019)**
Standaardbestek 250 voor de wegenbouw [versie 4.1].
Brussel : AWV.
<http://docs.wegenenverkeer.be/Standaardbestek%20250/Versie%204.1/>
Dernière consultation le 04/06/2019.

- 9. Pardo, L.-F. (2012)**
Roadsense: prévention des sorties involontaires de voie par lignes d'alerte routières audio-tactile.
Livrable 3.1.
Magny les Hameaux, France : Aximum.
- 10. Anelli, P. (2013)**
Roadsense: prévention des sorties involontaires de voie par lignes d'alerte audiotactiles: séminaire final, [s.l.], novembre 28, 2013.
Magny les Hameaux, France : Aximum.
- 11. Susini, P., Houix, O., Ventura, R. & Misdariis, N. (2013)**
Roadsense : prévention des sorties involontaires de voie par lignes d'alerte routières audio-tactile.
Livrable 3.2, constitution d'une base de stimuli sonores élémentaires associés aux bandes d'alerte et description en termes de paramètres d'urgence, d'identification et de compréhension.
Paris : Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique (IRCAM).
- 12. Federal Highway Administration (FHWA) (2011)**
Shoulder and edge line rumble strips.
Washington : FHWA. (Technical Advisory, T5040.39). Revision 1. https://safety.fhwa.dot.gov/roadway_dept/pavement/rumble_strips/t504039/t504039.pdf
Dernière consultation le 04/06/2019.
- 13. Federal Highway Administration (FHWA) (2015)**
Rumble strip implementation fact sheet: bicycles.
Washington : FHWA. (Rumble Strip Implementation Fact Sheet, FHWA-SA-15-030). https://safety.fhwa.dot.gov/roadway_dept/pavement/rumble_strips/bike_fs/rmbl_bikes_fs.pdf
Dernière consultation le 04/06/2019.
- 14. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2012)**
Guide for the development of bicycle facilities.
Washington : AASHTO. Fourth edition. <https://nacto.org/wp-content/uploads/2011/03/AASHTO-Guide-for-the-Development-of-Bicycle-Facilities-1999.pdf>
Dernière consultation le 04/06/2019.
- 15. Federal Highway Administration (FHWA) (2015)**
Rumble strip implementation fact sheet: pavement.
Washington : FHWA. (Rumble Strip Implementation Fact Sheet, FHWA-SA-15-030). https://safety.fhwa.dot.gov/roadway_dept/pavement/rumble_strips/media/RumbleStripFactSheet_Pavement/pavement_fs.pdf
Dernière consultation le 04/06/2019.
- 16. CTC & Associates (2012)**
Traffic noise generated by rumble strips.
Sacramento, USA : Caltrans - Division of Research and Innovation (DRI). Preliminary investigation. http://www.dot.ca.gov/research/researchreports/preliminary_investigations/docs/rumble_strip_noise_preliminary_investigation_3-5-12.pdf
Dernière consultation le 04/06/2019.

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie

- 17. Alatyppo, V., Valtonen, J. Hyypä, I. (2005)**
Noise and vibration effects of rumble strips (Taristavien viivojen melu- ja tarinatutkimus).
Helsinki : Finnish Road Administration. (Tiehallinnon Selvityksia, Finnra Reports, 3200933, 21/2005).
- 18. Kragh, J., Andersen, B. & Thomsen, S.N. (2007)**
Traffic noise at rumble strips.
Hedehusene, Denmark : Road Directorate. (Danish Road Institute Report, 156). Inter.noise 2007 paper. https://www.vejdirektoratet.dk/api/drupal/sites/default/files/publications/traffic_noise_at_rumble_strips.pdf
Dernière consultation le 04/06/2019.
- 19. Goubert, L. & Gail, A. (2017)**
Measuring the acoustic properties of audio tactile road markings.
In : Taming noise and moving quiet : proceedings of the 46th international congress and exposition on noise control engineering (Inter-Noise 2017), Honk Kong, August 27-30, 2017.
[s.l.] : Inter-Noise.
- 20. International Organization for Standardization (ISO) (2017)**
ISO 11819-2: Acoustics : measurement of the influence of road surfaces on traffic noise. Part 2, the close-proximity method.
Genève : ISO.
- 21. International Organization for Standardization (ISO) (2017)**
ISO/TS 11819-3: Acoustics: measurement of the influence of road surfaces on traffic noise. Part 3, reference tyres.
Genève : ISO.
- 22. International Organization for Standardization (ISO) (2017)**
ISO/TS 13471-1: Acoustics: temperature influence on tyre/road noise measurement. Part 1, correction for temperature when testing with the CPX method.
Genève : ISO.
- 23. Goubert, L., Debroux, P., Gail, A., Zöllner, M., De Cleck, K. & Verheyen, L. (2014)**
Assessing the acoustic properties of audio-tactile road markings.
In : Improving the world through noise control: proceedings of the 43rd international congress on noise control engineering (Inter-Noise 2014), Melbourne, November 16-19, 2014.
[s.l.] : Inter-Noise.
- 24. Wirtgen (2019)**
Small milling machine W 35 Ri.
Windhagen, Germany : Wirtgen. https://www.wirtgen.de/en/products/cold-milling-machines/small-milling-machines/w_35_ri.php
Dernière consultation le 04/06/2019.

25. Coremat-constructeur (2012)

Le sabot barrette manuel.

Champtocé-sur-Loire, France : Coremat-constructeur. <http://www.coremat-constructeur.fr/nos-produits/marquage/sabots/sabot-barette-manuel>

Dernière consultation le 04/06/2019.

26. Lequeux, Q. & Leblud, J. (2018)

Rapport statistique 2018: accidents de la route 2017.

Bruxelles : Institut VIAS. (Rapport de recherche VIAS, 2018-S-01-FR). https://www.vias.be/publications/Statistisch%20Rapport%202018%20-%20Verkeersongevallen/Rapport_statistique_2018_-_Accidents_de_la_route_2017.pdf

Dernière consultation le 04/06/2019.

L'utilisation de lignes d'alerte audiotactiles, ou bandes d'alerte sonores, afin de prévenir les sorties involontaires de voie