

TP 14103F

**ÉVALUATION DE KLAXONS DE LOCOMOTIVES :
Efficacité et vitesses d'exploitation**

Préparé pour le
Centre de développement des transports
Transports Canada

par
TranSys Research Ltd.

Juin 2003

**ÉVALUATION DE KLAXONS DE LOCOMOTIVES :
Efficacité et vitesses d'exploitation**

par

**G.W. English, F.A. Russo,
T.N. Moore, M.E. Lantz, C. Schwier**

TranSys Research Ltd.

Juin 2003

AVIS

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs et elles ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports de Transports Canada ou des organismes coparrains.

Le Centre de développement des transports n'a pas l'habitude de citer des noms de produits ou de fabricants. S'il le fait ici, c'est simplement pour la bonne compréhension du texte.

Ce rapport utilise à la fois les unités métriques et les unités impériales, étant donné que dans l'industrie, les deux systèmes d'unités ont cours.

PARTENAIRES FINANCIERS

Programme de recherche sur les passages à niveau de Direction 2006

Transports Canada

Association des chemins de fer du Canada

Canadien National

Canadien Pacifique

VIA Rail Canada Inc.

Alberta Transportation

Ministère des Transports du Québec

This report is also available in English under the title «*Locomotive Horn Evaluation: Effectiveness at Operating Speeds*», TP 14103E.



1. N° de la publication de Transports Canada TP 14103F		2. N° de l'étude 9919-20		3. N° de catalogue du destinataire	
4. Titre et sous-titre Évaluation de klaxons de locomotives : Efficacité et vitesses d'exploitation				5. Date de la publication Juin 2003	
				6. N° de document de l'organisme exécutant	
7. Auteur(s) G.W. English, F.A. Russo, T.N. Moore, et al.				8. N° de dossier - Transports Canada ZCD2450-D-718-8	
9. Nom et adresse de l'organisme exécutant TranSys Research Ltd. 682 Milford Drive Kingston, Ontario Canada K7M 6B4				10. N° de dossier - TPSGC MTB-0-00860	
				11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada T8200-000319/001/MTB	
12. Nom et adresse de l'organisme parrain Centre de développement des transports (CDT) 800, boul. René-Lévesque Ouest Bureau 600 Montréal (Québec) H3B 1X9				13. Genre de publication et période visée Final	
				14. Agent de projet S. Vespa	
15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.) Coparrainé par les partenaires financiers du Programme de recherche sur les passages à niveau de Direction 2006 : Association des chemins de fer du Canada, Canadien National, Canadien Pacifique, Via Rail Canada Inc., Alberta Transportation et le ministère des Transports du Québec					
16. Résumé <p>L'étude consistait à évaluer le positionnement et les caractéristiques acoustiques des klaxons de locomotives. La recherche visait à présenter des recommandations en vue de s'assurer que ce dispositif produit un signal d'avertissement adéquat aux fins de sécurité. Un deuxième objectif de cette recherche était d'étudier les plaintes de nuisance sonore présentées par les équipages des trains et les riverains des voies ferrées.</p> <p>Les travaux comprennent des activités de recherche en laboratoire afin de déterminer les caractéristiques d'avertissement souhaitables de ces dispositifs sonores, des mesures sur le terrain de l'influence de la position du klaxon sur son efficacité aux vitesses d'exploitation des trains de même qu'une évaluation en service de systèmes d'avertissement sonore de remplacement. Pour ce qui est de l'efficacité sécuritaire des dispositifs, les chercheurs ont étudié les comportements des piétons et des intrus sur le domaine ferroviaire, des conducteurs de véhicules immobilisés aux passages à niveau et des conducteurs en approche d'un passage à niveau.</p> <p>Des recommandations sont formulées pour revoir le positionnement des klaxons des locomotives neuves et pour que soient ajoutés des klaxons d'urgence ou des klaxons à deux niveaux, à l'avant de certains modèles de locomotives existantes.</p>					
17. Mots clés Sécurité aux passages à niveau, dispositif d'avertissement sonore, klaxon de locomotive, détection de signal, atténuation du bruit			18. Diffusion Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.		
19. Classification de sécurité (de cette publication) Non classifiée		20. Classification de sécurité (de cette page) Non classifiée		21. Déclassification (date) —	22. Nombre de pages xvi, 122, ann.
					23. Prix Port et manutention



1. Transport Canada Publication No. TP 14103F		2. Project No. 9919-20		3. Recipient's Catalogue No.	
4. Title and Subtitle Évaluation de klaxons de locomotives : Efficacité et vitesses d'exploitation				5. Publication Date June 2003	
				6. Performing Organization Document No.	
7. Author(s) G.W. English, F.A. Russo, T.N. Moore, et al.				8. Transport Canada File No. ZCD2450-D-718-8	
9. Performing Organization Name and Address TranSys Research Ltd. 682 Milford Drive Kingston, Ontario Canada K7M 6B4				10. PWGSC File No. MTB-0-00860	
				11. PWGSC or Transport Canada Contract No. T8200-000319/001/MTB	
12. Sponsoring Agency Name and Address Transportation Development Centre (TDC) 800 René Lévesque Blvd. West Suite 600 Montreal, Quebec H3B 1X9				13. Type of Publication and Period Covered Final	
				14. Project Officer S. Vespa	
15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.) Co-sponsored by the funding partners of the Direction 2006 Highway-Railway Grade Crossing Research program: Railway Association of Canada, Canadian National Railway, Canadian Pacific Railway, VIA Rail Canada Inc., Alberta Transportation, and the ministère des Transports du Québec					
16. Abstract <p>This study assessed the placement and sound characteristics of locomotive horns. Its objective was to provide recommendations to ensure adequate warning for safety reasons and to address excessive loudness complaints from crews and from residents near tracks.</p> <p>The scope of work involved laboratory investigations of desirable warning characteristics, field measurements of the influence of horn position on its effectiveness at operating speeds, and an in-service assessment of alternative horns. Safety effectiveness considerations included pedestrians/trespassers, drivers stopped at grade crossings, and drivers approaching grade crossings.</p> <p>Recommendations are made to reposition horns in new-build locomotives and to add emergency-only or two-level horns at the front of some models of existing locomotives.</p>					
17. Key Words Highway-railway grade crossing safety, auditory warning device, locomotive horn, signal detection, noise mitigation				18. Distribution Statement Limited number of copies available from the Transportation Development Centre	
19. Security Classification (of this publication) Unclassified		20. Security Classification (of this page) Unclassified		21. Declassification (date) —	22. No. of Pages xvi, 122, apps
				23. Price Shipping/ Handling	

REMERCIEMENTS

Le projet a été mené sous la conduite éclairée d'un Comité directeur formé des personnes suivantes : Sesto Vespa, Centre de développement des transports, Transports Canada (président); Paul Lepage, Sécurité ferroviaire, Transports Canada; Robert Becker et Hans Huber, VIA Rail Canada Inc.; Frank Brennan, Canadien Pacifique, et Anthony Napoli, consultant auprès du Centre de développement des transports. Les auteurs désirent remercier tous les membres de ce comité.

Ils remercient également Anya Carroll et Amanda Rapoza, du Volpe Center, pour les commentaires et les données qu'elles leur ont aimablement fournis, Bill Challenger et Loi Truong, de AirChime Manufacturing, pour leur aide dans l'étude de nouvelles options de klaxons et dans les essais de caractérisation des klaxons, Lola Cuddy, du Département de psychologie de l'Université Queen's, pour leur avoir ouvert son laboratoire d'acoustique et pour les conseils qu'elle-même et Gerry Wilde leur ont prodigués.

Leurs remerciements vont aussi aux représentants de VIA Rail Canada Inc., de West Coast Express, de GO Transit, du Canadien Pacifique et du Canadien National pour avoir collaboré aux essais de klaxons et/ou pour leur avoir transmis les résultats d'essais antérieurs.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du Programme de recherche sur les passages à niveau, exécuté sous le parrainage de Transports Canada, des grandes sociétés ferroviaires canadiennes et de plusieurs gouvernements provinciaux. Ce programme est une composante de Direction 2006, un projet coopératif dont l'objectif est de diminuer de moitié le nombre d'accidents aux passages à niveau d'ici 2006.

Sommaire

La recherche avait pour objectifs d'étudier l'emplacement des klaxons sur les locomotives et le niveau sonore émis, et de formuler des recommandations pour concilier les impératifs de sécurité, qui exigent un avertissement efficace, avec les demandes de réduction du bruit exprimées par les équipes de train et par les collectivités riveraines des voies ferrées.

Les résultats des essais révèlent que l'efficacité des klaxons de locomotives actuels varie grandement lorsque les mesures sont prises aux vitesses d'exploitation des trains. Ainsi, lorsque le klaxon est placé ailleurs qu'à l'avant de la locomotive, la projection du son vers l'avant (en particulier des hautes fréquences) diminue d'autant que la vitesse du train augmente. Les klaxons montés juste derrière l'échappement sont de loin les moins efficaces. Dans de nombreux cas, un klaxon placé à cet endroit ne pourrait donner un avertissement efficace aux automobilistes s'approchant d'un passage à niveau, et peu de conducteurs déjà immobilisés au passage à niveau seraient alertés par ce klaxon. Quant aux piétons, ils entendraient le klaxon, mais seuls les plus prudents associeraient le son à l'arrivée imminente d'un train. De plus, l'urgence perçue serait moindre que si le même klaxon était monté à l'avant de la locomotive.

L'avertissement nécessaire aux véhicules immobilisés qui ont besoin de beaucoup de temps pour dégager la voie dépasse les limites d'un dispositif d'avertissement sonore lorsque le train se déplace à grande vitesse. De même, les besoins d'avertissement aux passages à niveau non automatisés où les circulations ferroviaire et routière sont toutes deux rapides dépassent les limites des dispositifs d'avertissement sonore des locomotives.

Les chercheurs ont défini un certain nombre de caractéristiques souhaitables d'un dispositif d'avertissement sonore, pour constater que le klaxon pneumatique actuellement en usage sur les locomotives offre ces caractéristiques. Ainsi, le contenu en harmoniques est plus important que la fréquence fondamentale. Et un spectre large améliore la détection du signal à l'intérieur des véhicules, de même que l'urgence apparente qui y est associée.

Il est possible de réduire la gêne due au bruit dans la collectivité sans compromettre indûment l'efficacité de l'avertissement. Une façon de faire consiste à déterminer un délai d'avertissement fixe plutôt qu'une distance d'avertissement fixe. Une autre possibilité serait de recourir à des klaxons à deux niveaux sonores montés à l'avant de la locomotive. Un des niveaux sonores correspondrait à un avertissement «normal» et serait plus bas que l'autre niveau, qui serait réservé aux situations d'urgence perçue. D'autres mesures de focalisation des sons, envisageables pour les nouvelles locomotives, ont également été étudiées.

Le bruit engendré dans la cabine de la locomotive est le principal obstacle qui empêche de placer le klaxon à l'endroit où il assure l'avertissement le plus efficace. Il faudra encore des analyses et

des expériences pour trouver la façon optimale de réduire l'intensité du son dans la cabine, mais déjà des méthodes acceptables semblent à portée. Il faudra certes résoudre ce problème à la satisfaction mutuelle des sociétés ferroviaires et des travailleurs du rail, mais il y a tout lieu de croire que cela pourra être fait avant l'échéance de 2006, fixée au programme *Direction 2006*.

Table des matières

1.	INTRODUCTION	1
1.1	CONTEXTE.....	1
1.2	CHAMP D'APPLICATION ET D'EXCLUSION DE L'ÉTUDE.....	3
1.3	OBJECTIFS	4
1.4	ORGANISATION DU RAPPORT	4
2.	DÉFINITIONS ET CONCEPTS	5
2.1	DÉFINITIONS DE BASE	5
2.2	ENJEUX.....	6
2.2.1	<i>Limites des dispositifs d'avertissement sonore</i>	6
2.2.2	<i>Études sur la capacité des avertissements sonores à prévenir les accidents</i>	8
2.2.3	<i>Inconnues examinées dans le présent rapport</i>	9
3.	DÉTECTION ET URGENCE APPARENTE DU SIGNAL	11
3.1	DONNÉES TIRÉES DE LA DOCUMENTATION.....	11
3.1.1	<i>Détection d'un signal lorsque le rapport S/B est négatif</i>	12
3.1.2	<i>Niveaux-seuils d'intensité</i>	14
3.2	EXPÉRIENCES DE DÉTECTION DE SIGNAUX SONORES.....	16
3.2.1	<i>Résultats des expériences</i>	16
3.2.2	<i>Sélection d'un modèle de détection des signaux sonores</i>	19
3.2.3	<i>Corrélation du modèle avec d'autres données</i>	20
3.3	ÉVALUATION DE L'URGENCE APPARENTE DU SIGNAL	22
3.3.1	<i>Données tirées de la documentation</i>	22
3.3.2	<i>Expériences portant sur les sons purs</i>	24
3.3.3	<i>Expériences sur le son des klaxons</i>	26
3.3.4	<i>Discussion des résultats</i>	28
4.	INFLUENCE DE L'EMPLACEMENT DU KLAXON ET DE LA VITESSE DU TRAIN	29
4.1	RETOUR SUR LA RECHERCHE DOCUMENTAIRE	29
4.1.1	<i>Influence de l'emplacement du klaxon, établie à l'aide d'essais statiques</i>	29
4.1.2	<i>Influence de la vitesse du train, selon les données d'autres chercheurs</i>	30
4.2	SITES ET PROTOCOLES D'ESSAI	33
4.3	COMPARAISON DES SIGNAUX «TELS QUE PERÇUS»	36
4.3.1	<i>Comparaison des niveaux d'énergie acoustique totale</i>	36
4.3.2	<i>Illustration spectrographique à un faible rapport S/B</i>	38
4.4	SIGNAUX SOURCES - COURBES POLAIRES DÉRIVÉES	40
4.4.1	<i>Influence de l'emplacement longitudinal</i>	41
4.4.2	<i>Influence de la vitesse</i>	45
4.5	INFLUENCE DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET DE LA GÉOMÉTRIE DES APPROCHES ROUTIÈRES.....	49
4.6	HAUTEUR DU KLAXON MONTÉ À L'AVANT	51

5.	EFFICACITÉ DES KLAXONS DE LOCOMOTIVES	55
5.1	COMPARAISON DES SPECTROGRAMMES ACOUSTIQUES	55
5.1.1	<i>Avertissement nécessaire pour les piétons et les intrus</i>	55
5.1.2	<i>Interprétation des spectrogrammes acoustiques</i>	56
5.1.3	<i>Comparaison des spectrogrammes – cas des piétons et des intrus</i>	57
5.1.4	<i>Comparaison de spectrogrammes à 70 m du passage à niveau</i>	60
5.2	AVERTISSEMENT NÉCESSAIRE POUR CONDUCTEURS DE VÉHICULES.....	63
5.2.1	<i>Avertissement nécessaire à l’intérieur des véhicules</i>	63
5.2.2	<i>Avertissement nécessaire pour un véhicule immobilisé à un passage à niveau et faisabilité</i>	72
5.2.3	<i>Avertissement requis pour un véhicule à l’approche d’un passage à niveau et faisabilité</i>	74
5.3	CONSÉQUENCES POUR LE NIVEAU SONORE	80
5.4	CONSÉQUENCES POUR L’EMPLACEMENT DU KLAXON	85
6.	NOUVELLES OPTIONS : QUESTIONS D’EFFICACITÉ ET DE BRUIT	87
6.1	EFFICACITÉ DE L’AVERTISSEMENT	88
6.2	GÊNE DUE AU BRUIT DANS LES COLLECTIVITÉS RIVERAINES.....	92
6.2.1	<i>Définitions</i>	93
6.2.2	<i>Efficacité à atténuer la gêne due au bruit dans la collectivité</i>	94
6.3	NIVEAU D’ACCEPTATION DE LA PART DES ÉQUIPES DE TRAIN	99
7.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	109
	RÉFÉRENCES	119

ANNEXE A Avis de projet de règle sur les klaxons de locomotives émis par la Federal Railroad Administration des États-Unis (extraits)

ANNEXE B Klaxons en bordure de voie

ANNEXE C Règle de la Federal Railroad Administration des États-Unis pour accroître la visibilité des locomotives

ANNEXE D Expériences en laboratoire sur la détection et l’urgence apparente du signal

ANNEXE E Locomotives utilisées pour les essais en service payant et quelques mesures choisies

ANNEXE F Klaxon hypothétique à diagramme conformé

Liste des figures

Figure 1	Effet du bruit de fond sur l’audibilité (modèle de Corliss)	13
Figure 2	Niveaux d’alerte sonores nécessaires à l’extérieur des véhicules selon Aurelius.....	15
Figure 3	Bruit produit et courbe de l’ISO relative au masquage.....	17
Figure 4	Seuil de détection moyen observé lors d’essais en laboratoire et en véhicule.....	18
Figure 5	Comparaison de filtres auditifs à 4 kHz.....	20
Figure 6	Caractéristiques de masquage dérivées - milieu sonore à l’intérieur d’un véhicule.....	21
Figure 7	Urgence apparente des sons purs en l’absence de bruit.....	25
Figure 8	Urgence apparente de sons masquées.....	25
Figure 9	Facteurs contribuant à l’urgence apparente des signaux de klaxon.....	27
Figure 10	Caractéristiques spectrales des klaxons représentatifs.....	30
Figure 11	Mesures de Travail Canada sur un klaxon en mouvement et un klaxon à l’arrêt.....	31
Figure 12	Essais d’Aurelius sur des klaxons de Metroliner en mouvement et à l’arrêt.....	31
Figure 13	Essais de VIA Rail : spectres des sons émis par les klaxons, à deux vitesses.....	32
Figure 14	Photographies du passage à niveau South Blair.....	35
Figure 15	Schéma de la géométrie du passage à niveau South Blair.....	36
Figure 16	Comparaison du niveau de pression acoustique produit par un klaxon à 5 cornets.....	37
Figure 17	Comparaison des niveaux de pression acoustique produits par des klaxons à 3 cornets au passage à niveau South Blair.....	38
Figure 18	Comparaison du niveau de pression acoustique signal/bruit et spectrogramme correspondant.....	39
Figure 19	Courbes polaires de klaxons à 3 cornets de locomotives de trains de voyageurs.....	43
Figure 20	Courbes polaires de klaxons à 3 cornets de locomotives de trains de marchandises.....	44
Figure 21	Photo de klaxon en milieu de locomotive.....	44
Figure 22	Diagramme directionnel d’un klaxon à 5 cornets, à vitesse moyenne.....	45
Figure 23	Diagramme directionnel du klaxon à 5 cornets de la locomotive Genesis.....	46
Figure 24	Influence de la vitesse sur l’atténuation du son vers l’avant.....	47
Figure 25	Illustration de la réfraction du son du klaxon.....	48
Figure 26	Influence de la vitesse/hauteur du klaxon - Locomotive Genesis.....	49
Figure 27	Sensibilité au vent du klaxon de la locomotive Genesis, à 95 mi/h.....	50
Figure 28	Illustration de l’effet de sol sur la perception du son.....	51
Figure 29	Influence de la hauteur du klaxon sur l’effet de sol.....	53
Figure 30	Illustration du code de couleur d’un spectrogramme (klaxon à 5 cornets monté à l’avant).....	56
Figure 31	Effet de l’oreille et de l’atmosphère dans l’atténuation du spectre du klaxon.....	57
Figure 32	Spectrogrammes de klaxons à 5 cornets montés à l’avant et en milieu de locomotive.....	59
Figure 33	Spectrogrammes enregistrés à 70 m du passage à niveau.....	62
Figure 34	Sensibilité du bruit à l’intérieur d’un véhicule, à 60 km/h.....	65
Figure 35	Sensibilité du bruit à l’intérieur d’un véhicule au bruit du ventilateur.....	65

Figure 36	Filtre efficace du son du klaxon perçu par l'automobiliste.....	68
Figure 37	Comparaison des caractéristiques de deux klaxons par rapport à un seuil de niveau sonore.....	69
Figure 38	Niveau de pression acoustique à l'intérieur du véhicule et rapports S/B pour un klaxon audible.....	70
Figure 39	Niveau sonore requis pour des vitesses et des angles de passage à niveau donnés	78
Figure 40	Niveau sonore produit par un klaxon de locomotive F40 à 90 mi/h vs niveau requis	79
Figure 41	Intensité du klaxon nécessaire à 97 km/h.....	81
Figure 42	Intensité du klaxon nécessaire à 47 km/h.....	81
Figure 43	Illustration des modifications apportées au klaxon de la locomotive Genesis.....	87
Figure 44	Comparaison klaxon d'urgence - klaxon monté en milieu de locomotive, à 90 mi/h.....	89
Figure 45	Emplacement du klaxon à deux niveaux d'intensité sonore monté sur le toit de la locomotive F59	90
Figure 46	Comparaison d'un klaxon avant à deux niveaux sonores et d'un klaxon en milieu de locomotive, à 60 mi/h.....	91
Figure 47	Comparaison du SEL aux signaux des klaxons, à des distances latérales fixes.....	96
Figure 48	Comparaison de l'effet sur la collectivité selon le nombre de trains par jour.....	97
Figure 49	Comparaison de l'aire de réduction du L_{dn} autour du passage à niveau	98
Figure 50	Influence de la réglementation sur le niveau de bruit dans la cabine sur le niveau sonore du klaxon.....	101
Figure 51	Influence du bruit ambiant sur la limite de niveau sonore du klaxon	102
Figure 52	Spectres acoustiques à l'intérieur de cabines de locomotives de différents âges.....	103
Figure 53	Efficacité des protecteurs auditifs	104

Liste des tableaux

Tableau 1	Comparaison des accidents aux passages à niveau avec et sans abolition du sifflement des trains aux États-Unis.....	9
Tableau 2	Comparaison des niveaux de masquage de l'ISO et du modèle de Patterson corrigé.....	21
Tableau 3	Spectre des fréquences de cornets de klaxons (en dB, normalisées à 100 pi).....	26
Tableau 4	Méthode de dérivation des signaux sources.....	41
Tableau 5	Paramètres utilisés pour le calcul de l'effet de sol.....	52
Tableau 6	Influence de la hauteur sur l'effet de sol, SPL sur l'ensemble du spectre (dBA).....	54
Tableau 7	Calcul de l'urgence extrapolée pour divers emplacements du klaxon.....	60
Tableau 8	Hypothèses de scénarios d'alerte dans un véhicule à l'arrêt.....	66
Tableau 9	Avertissement (dBA à 100 pi) requis pour les véhicules arrêtés à un passage à niveau.....	74
Tableau 10	Hypothèses concernant trois scénarios d'alerte pour des véhicules en mouvement.....	77
Tableau 11	Norme britannique visant l'intensité sonore des klaxons.....	82
Tableau 12	Normes australiennes (Queensland) visant l'intensité sonore des klaxons.....	83
Tableau 13	Calage du modèle de SEL sur les données de Mundelein.....	95
Tableau 14	Niveau sonore dans la cabine d'une locomotive F40 équipée d'un klaxon K5 monté sur l'avant de la cabine.....	105

Liste des sigles

ABS	Système de freinage antiblocage
ACFC	Association des chemins de fer du Canada
ANR	Atténuation active du bruit
ASM	Niveau minimal d'avertissement sonore nécessaire, compte tenu des conditions d'un scénario donné.
BST	Bureau de la sécurité des transports du Canada
DMA	Distance minimale nécessaire pour l'annonce d'un signal, compte tenu des conditions d'un scénario donné.
DOT	Department of Transportation des États-Unis
FRA	Federal Railroad Administration des États-Unis
HUD	Department of Housing and Urban Development des États-Unis
IDB	L' <i>indice de dépréciation due au bruit</i> représente la diminution de la valeur d'une maison exprimée en pourcentage par dBA au-delà d'un seuil sonore prédéfini.
ISO	Organisation internationale de normalisation
L_{dn}	Le <i>niveau sonore jour-nuit</i> représente la valeur moyenne du niveau de bruit émis par toutes les sources pour une période de 24 heures, avec une augmentation de niveau équivalant à 10 dB entre 22 h et 7 h.
$L_{eq(p)}$	Le <i>niveau continu équivalent</i> représente la valeur moyenne du niveau de bruit émis par toutes les sources pour une période déterminée (p) (aussi désigné $L_{ex(p)}$).
$L_{ex(8)}$	Il s'agit de la valeur moyenne du niveau de bruit émis par toutes les sources pour une période de huit heures.
LIRR	Long Island Railroad
L_{max}	Le <i>niveau sonore maximal</i> (ou la composante la plus élevée) d'un seul événement bruit.
LRC	Léger, rapide, confortable (sigle désignant un train)
NTSB	National Transportation Safety Board des États-Unis
P_{ref}	Niveau de référence
S/B	Rapport signal/bruit, ou différence entre le niveau du signal et le niveau de bruit de fond.
SD	Secteur de dénombrement
SEL	Le <i>niveau d'exposition sonore</i> représente la valeur moyenne du niveau de bruit émis par un seul événement pendant toute sa durée. Aux fins du calcul du SEL, la durée normalisée d'exposition au bruit est d'une seconde, ce qui permet de comparer l'énergie sonore dissipée par différents événements de bruit.

S/M	Rapport signal/masque, où le masque représente l'effet masquant qu'a le bruit ambiant sur l'oreille humaine.
SPL	Niveau de pression acoustique mesuré en décibels (dB) par rapport à un niveau de référence de 20 micropascals.
SPL (dBA)	<i>Niveau de pression acoustique pondéré en A</i> produite par un bruit à tout moment.
SPL (dBC)	<i>Niveau de pression acoustique pondéré en C</i> produite par un bruit à tout moment.
SPL (dBL)	<i>Niveau de pression acoustique non pondéré ou linéaire</i> , produite par un bruit à tout moment.
SST	Sécurité et santé au travail
Trav	Travail Canada
WCE	Désigne le <i>West Coast Express</i> , un train de banlieue qui fait la navette entre Mission et Vancouver, en Colombie-Britannique.

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte

Le 12 juillet 1996, une piétonne a été heurtée et mortellement blessée par un train de voyageurs de Via Rail, dans la ville de Tecumseh, en Ontario. La sœur de la victime était également présente, mais elle a réussi à éviter d'être heurtée par le train. Le Bureau de la sécurité des transports (BST) du Canada a effectué une enquête sur cet accident ferroviaire et a publié un rapport qui expose les résultats de l'enquête et les facteurs qui ont contribué à l'accident [BST, 1996].

Outre divers autres facteurs à l'origine de l'accident, le BST a déterminé que la piétonne n'a pas entendu le son du klaxon de la locomotive du train qui s'approchait à temps pour pouvoir en localiser la source, décider d'un plan d'action et mettre ce plan à exécution avant d'être heurtée par le train. Des essais réalisés par le BST ont révélé que le niveau sonore du klaxon ne dépassait celui du bruit de fond (environ 55 dB) que dans les cinq secondes précédant le moment où la piétonne a été heurtée par le train. Selon le BST, d'autres facteurs peuvent avoir limité l'efficacité du klaxon en tant que dispositif d'avertissement :

- *Des sons concurrents peuvent masquer les avertissements sonores ou attirer l'attention de l'auditeur, ou les deux (p. ex., le lieu de l'accident est en ligne directe avec la trajectoire de vols de l'aéroport de Windsor).*
- *L'exposition quotidienne aux signaux d'avertissement des locomotives peut avoir diminué la capacité des piétonnes à porter attention à un signal les avertissant de l'approche d'un train.*
- *L'emplacement du klaxon sur la locomotive de VIA, sur le toit, à mi-chemin vers l'arrière, en retrait sous une barrière et directement derrière la cheminée d'échappement, ne fait rien pour optimiser l'intensité des sons projetés vers l'avant (mais respecte les exigences de la norme de la Federal Railroad Administration (FAA) des États-Unis, qui sont de 96 dB, et diminue le bruit qui pénètre dans la cabine quand on actionne le klaxon).*
- *Il se peut que les piétonnes n'aient pas détecté et identifié le klaxon de la locomotive à temps parce que les vents modérés du sud-est qui soufflaient en direction de la locomotive en avaient atténué l'intensité.*
- *Il se peut que les piétonnes aient eu de la difficulté à localiser le train à cause de leurs positions relatives. Le train était directement derrière elles, ce qui créait une ambiance sonore à l'intérieur de laquelle les humains ont toujours eu de la difficulté à localiser les sources sonores, surtout les sons composés de fréquences inférieures à 7 000 Hz.*

Le BST a noté, dans ses conclusions :

Les règlements fédéraux actuels ne contiennent pas d'exigences relatives aux fréquences sonores émises par les klaxons de locomotives ni à l'intensité ou à la modulation de l'énergie acoustique qui doivent prévaloir à certaines distances spécifiées, dans tous les sens, en provenance d'une locomotive à l'arrêt ou en marche.

Il a également fait état du danger suivant :

Il faut aussi noter que la fréquence sonore du klaxon de locomotive vient du fait que l'on a exigé qu'il ressemble à un sifflet à vapeur et que son positionnement répond à des exigences formulées par des équipes de locomotives. Le Bureau est préoccupé par le fait que le manque de perspective d'ensemble en ce qui concerne les exigences relatives au klaxon des locomotives puisse compromettre son efficacité en tant que dispositif d'avertissement. Le Bureau est conscient qu'il faut tenir compte de divers facteurs avant de modifier la conception traditionnelle du klaxon, par exemple la familiarité du signal, les niveaux de bruit dans la cabine et les questions liées à la pollution par le bruit en milieu urbain. Il serait peut-être avisé de chercher à mettre au point un autre type de dispositif d'avertissement qui ne serait utilisé qu'en cas d'urgence. Un tel dispositif pourrait avoir une plus grande portée et émettre un son de plus haute fréquence qui attirerait mieux l'attention.¹

Comme il est noté ci-dessus, la réglementation actuelle de Transports Canada concernant les klaxons de locomotives exige que ceux-ci émettent un son qui ressemble à celui d'un sifflet à vapeur. Pendant qu'en cette matière, les pratiques des chemins de fer canadiens surpassent généralement les règles de la Federal Railroad Administration des États-Unis sur les klaxons de locomotives (96 dBA à 30,5 m), la FRA a émis un avis de projet de règle sur les klaxons de locomotives [Federal Register, 2000]. Ce projet de règle est discuté en détail à la section 5.3. Le libellé de l'avis figurant dans le *Federal Register* est partiellement reproduit, en traduction, à l'annexe A.

Compte tenu de ce qui précède et des travaux entrepris par l'Association des chemins de fer du Canada (ACFC) pour élaborer un projet de règlement touchant les klaxons de locomotives, Transports Canada a commandé une étude sur l'efficacité des avertissements sonores. C'est donc en collaboration avec les chemins de fer canadiens et sous l'égide de Direction 2006 que Transports Canada a lancé le présent projet.

¹ Un rapport du coroner en chef de l'Ontario portant sur le même accident recommandait que «VIA Rail Canada Inc. installe sur tous ses trains de voyageurs un dispositif d'avertissement sonore d'urgence produisant un son sensiblement différent du coup de sifflet qu'émettent actuellement les trains aux passages à niveau. Ce dispositif d'avertissement d'urgence supplémentaire devrait s'actionner automatiquement lorsque les freins d'urgence sont appliqués».

1.2 Champ d'application et d'exclusion de l'étude

En élaborant son règlement, l'ACFC s'est demandé s'il y avait lieu d'établir des prescriptions différentes pour les trains de voyageurs grande vitesse. Une des raisons de cette interrogation est le taux élevé de collisions aux passages à niveau et d'accidents survenus à des intrus mettant en cause des trains de voyageurs. Le BST [1996] a noté que, pour l'ensemble des accidents survenus à des intrus au Canada qui lui ont été signalés entre 1992 et 1997, les trains de voyageurs étaient plus souvent en cause que les trains de marchandises – les trains de VIA Rail ont affiché un taux moyen d'accidents (par million de train-mille) de 2,71, comparativement au taux de 1,2 pour les trains de marchandises (et autres).

Aussi la présente étude porte-t-elle sur les trains grande vitesse, dont le klaxon doit être particulièrement efficace. Les intérêts particuliers de VIA Rail, tels qu'évoqués dans la demande de propositions et pris en compte dans la conduite de l'étude, découlent de :

...la crainte que l'on élabore de nouvelles normes touchant les klaxons de locomotives sans vraiment prendre en compte les questions soulevées par l'accident de Tecumseh (BST, 1996). Selon VIA Rail, il y a lieu de pousser plus loin la recherche pour rendre les signaux sonores plus efficaces, surtout en cas de danger imminent. De tels travaux devraient englober les volets suivants :

- *La position et le niveau sonore optimaux des klaxons actuels, compte tenu de la projection du son vers l'avant et des niveaux de bruit dans la cabine de conduite.*
- *Les avantages potentiels de la modification des fréquences sonores des klaxons.*
- *Les avantages potentiels de dispositifs d'avertissement sonore supplémentaires activés en cas de danger imminent, comme il en existe sur les véhicules d'urgence.*
- *Les facteurs mis en relief par l'enquête du BST, comme l'écart entre le niveau sonore de l'avertissement et le niveau de bruit ambiant, et le délai de réaction, aux vitesses auxquelles se déplacent les trains de voyageurs (BST, 1996).*

Une des «nouveauités» en matière d'avertissement, qui a été évaluée aux États-Unis, est l'installation d'un dispositif d'avertissement en bordure de voie. Ce genre de dispositif n'est pas traité dans la présente étude, mais l'annexe B commente certains aspects des travaux réalisés à ce jour.

Le Comité directeur a également écarté de la présente étude les dispositifs d'avertissement sonore montés ailleurs que sur le train. Car, même s'il est plausible qu'à long terme, ces technologies inédites entraînent des gains de sécurité, elles susciteraient sans doute des risques dans l'immédiat, si les gens n'étaient pas en mesure d'associer le signal à l'arrivée imminente d'un train. De toute manière, les spectres des klaxons existants présentent une telle variété qu'il y a amplement place pour approfondir certaines de leurs caractéristiques sans s'occuper de quelque autre dispositif d'avertissement pour l'instant.

Le présent projet englobait, à l'origine, les dispositifs d'alerte visuelle. Or, les chemins de fer américains utilisent depuis quelques années déjà divers types de feux auxiliaires. Ainsi, la FRA a mené des évaluations de divers types de feux, à éclats notamment, utilisés pour accroître la

visibilité d'une locomotive [Carroll et coll., 1995], à la suite de quoi elle a publié des exigences réglementaires (voir l'annexe C pour plus de détails). Les phares de fossé qui équipent la plupart des locomotives canadiennes répondent déjà aux exigences de la FRA. Une des interrogations que se pose toujours la FRA a trait à l'avantage des feux clignotants par rapport aux feux continus. Nous croyons qu'il serait futile de poursuivre au Canada des travaux sur ces mêmes thèmes. Nous recommandons plutôt à Transports Canada de suivre de près les travaux de la FRA portant sur la comparaison des feux clignotants et des feux continus. Il pourrait également être intéressant de faire une analyse chronologique des données sur les accidents survenus aux passages à niveau aux États-Unis, avant et après la transition vers les feux à éclats ou les phares de fossé.

1.3 Objectifs

Au champ d'étude assigné au présent projet sont associés des objectifs plus précis, soit :

Étudier l'emplacement des klaxons sur les locomotives et le niveau sonore émis, et formuler des recommandations pour concilier les impératifs de sécurité, qui exigent un avertissement efficace de l'arrivée d'un train, et les demandes de réduction du bruit exprimées par les équipes de train et par les collectivités riveraines des voies ferrées.

1.4 Organisation du rapport

La suite du rapport comprend six sections.

Le chapitre 2 rend compte des questions clés qui se sont dégagées de la recherche documentaire et de la revue des données d'essai publiées.

Le chapitre 3 énumère les critères utilisés pour évaluer l'efficacité des dispositifs d'avertissement sonore et rend compte des expériences sur la détection et l'urgence apparente des signaux.

Le chapitre 4 discute de l'influence de la vitesse du train et de l'emplacement du klaxon sur l'efficacité de ce dernier.

Le chapitre 5 expose les impératifs de sécurité et les met en rapport avec les caractéristiques des klaxons.

Le chapitre 6 recense diverses options nouvelles de klaxons, sous l'angle de la sécurité, de la gêne due au bruit dans la collectivité et des niveaux de bruit dans la cabine de conduite.

Le chapitre 7 regroupe les conclusions et recommandations formulées au terme de l'étude.

2 DÉFINITIONS ET CONCEPTS

2.1 Définitions de base

Cette section regroupe les définitions des termes utilisés pour décrire les caractéristiques d'un klaxon de locomotive. D'autres termes seront définis au fur et à mesure.

Règle générale, la mesure acoustique fait appel à des instruments qui mesurent une variation de pression. Ainsi, le niveau de pression acoustique (SPL) est mesuré en décibels (dB) par rapport à un niveau de référence ($P_{\text{réf}}$) de 20 micropascals. La perception des sons ne suit pas une courbe linéaire : le SPL (P_{mes}), mesuré en décibels (dB), définit un rapport logarithmique décimal où :

$$\text{SPL (dB)} = 10 \log (P_{\text{mes}}) / (P_{\text{réf}})$$

Comme la puissance du son est mesurée sur une échelle logarithmique, chaque augmentation de 3 dB sur cette échelle a pour effet de doubler le niveau sonore (c.-à-d. $10 \log (2) \sim 3$). Il faut toutefois une augmentation d'environ 10 dB de la puissance sonore pour que l'oreille perçoive le son deux fois plus fort.

Un signal sonore peut être caractérisé par la fréquence relative des composantes du son pur sous-jacent. On peut ainsi caractériser les klaxons de locomotives à l'intérieur de la gamme de fréquences (ou du spectre) de leur composante fondamentale la plus faible (311 Hz pour la plupart des klaxons de locomotives canadiens) jusqu'à l'harmonique n° 7 de leur composante fondamentale la plus élevée (c.-à-d. $7 \times 311 = 2177$ Hz, pour un klaxon à 5 cornets).

L'oreille ne perçoit pas de façon uniforme toutes les fréquences. La mesure du son est donc souvent «corrigée» pour tenir compte de la façon dont l'oreille humaine interprète les sons. Ainsi, un niveau sonore pondéré en A (exprimé par l'unité «dBA») indique que le son a été filtré, c.-à-d. que l'on a atténué les très hautes et très basses fréquences, ce qui reflète la façon dont l'oreille humaine perçoit les sons de faible intensité. Sans cette pondération en A, les instruments de mesure acoustique réagiraient aux bruits inaudibles par l'oreille humaine, comme les sifflets pour chien (hautes fréquences) et les ébranlements sismiques (basses fréquences). Dans le cas d'une mesure spectrale, une échelle linéaire est souvent utilisée, mais seul le domaine des fréquences intéressantes est retenu aux fins des analyses subséquentes.

La fréquence acoustique est elle aussi habituellement représentée sur une échelle logarithmique. Ainsi, un octave correspond à un intervalle de deux fréquences, dont l'une est le double de l'autre. Lorsqu'il s'agit d'une bande (ou gamme) de fréquences, le SPL est intégré à une bande de largeur déterminée et centré sur la fréquence spécifiée. Les sonomètres, à l'instar de la plupart des acousticiens, expriment la mesure acoustique en bandes d'un octave ou d'un tiers d'octave. La plupart des mesures du présent rapport concernent des bandes d'un tiers d'octave.

2.2 Enjeux

La principale difficulté qui se pose, dans l'évaluation de l'efficacité des klaxons de locomotives, c'est de résoudre la contradiction apparente entre les résultats de différentes études. En effet, les études fondées sur des analyses et des mesures acoustiques ont conclu à l'inefficacité du klaxon de locomotive en tant que dispositif d'avertissement. Mais en même temps, certaines études sur les accidents ont mené à la conclusion que l'abolition du sifflement des trains augmente le risque d'accidents.

2.2.1 Limites des dispositifs d'avertissement sonore

Nombre d'études axées sur la mesure acoustique ont révélé que les dispositifs d'avertissement sonore en général, et les klaxons de locomotives en particulier, sont inefficaces. Une étude du National Transportation Safety Board [NTSB, 1986] s'est penchée sur 75 collisions entre des trains de banlieue et des véhicules automobiles à des passages à niveau. Dans 27 cas, le dispositif d'avertissement sonore du train s'était révélé inefficace à cause du niveau élevé de bruit ambiant à l'intérieur du véhicule automobile, ou du niveau de bruit généré par le moteur du véhicule. Comme les occupants des véhicules n'avaient pas pu entendre l'avertissement sonore émis par le train, le NTSB a conclu à l'inefficacité du dispositif d'avertissement sonore existant en tant que dispositif d'avertissement primaire. D'où la nécessité, toujours selon le NTSB, d'améliorer les klaxons de locomotives pour qu'ils soient mieux audibles.

Le rôle du klaxon de locomotive a également été au centre d'une étude plus récente du NTSB [1998] portant sur la sécurité aux passages à niveau non automatisés. Les chercheurs ont passé en revue 60 rapports d'accidents survenus à des passages à niveau non automatisés. Dans 55 des 60 accidents, le klaxon de locomotive avait été actionné. Dans 14 des 18 cas où il a été possible d'interroger l'automobiliste impliqué dans l'accident, le klaxon avait été actionné. Mais seulement deux conducteurs ont déclaré avoir entendu le klaxon de l'intérieur de leur véhicule (deux autres étaient déjà sortis de leur véhicule au moment où ils ont entendu le klaxon).

Le NTSB a aussi réalisé des mesures acoustiques sur le terrain d'un klaxon de locomotive dont l'intensité sonore avait été réglée conformément aux exigences de la FRA, soit à 96 dBA à 100 pi. Lors d'essais statiques à 100 pi, les chercheurs ont constaté ce qui suit :

Les mesures du NTSB ont montré que dans un des véhicules d'essai (un autobus d'écolier Thomas/Ford, modèle 1997), le son du klaxon du train n'était pas audible, enterré qu'il était par le bruit du moteur au ralenti. Dans sept véhicules d'essai, le klaxon n'était pas audible, en raison du moteur qui tournait au ralenti et du bruit du ventilateur. Dans aucun des véhicules d'essai dont le moteur tournait au ralenti pendant que le ventilateur était en marche, l'intensité sonore du klaxon de locomotive n'atteignait les 10 dB de plus que le niveau sonore ambiant nécessaires pour «alerter» un automobiliste contre l'approche d'un train.

Le NTSB a conclu que :

pour les conducteurs de certains véhicules qui se trouvent sur les routes de nos jours, le signal sonore émis par un klaxon de locomotive à une distance de 100 pieds n'est pas suffisant pour pénétrer dans l'habitacle et alerter les occupants contre la présence d'un train.

Au débat public organisé par le NTSB, un audiologiste a témoigné que :

l'accent devrait davantage porter sur le fait – non pas l'idée, mais le fait – qu'il existe de nombreuses circonstances où les klaxons ne sont pas et ne peuvent pas être audibles.

Aurelius et Korobow [1971] ont réalisé parmi les premières études sur divers klaxons de locomotives en usage à leur époque (un sifflet Hancock, un sifflet pneumatique à 1 cornet émettant à 156 Hz, plusieurs sifflets pneumatiques à 2 et 3 cornets, et un sifflet pneumatique à 5 cornets). Leurs essais, qui visaient à définir les niveaux sonores et les distances de déclenchement du signal nécessaires à un avertissement efficace, sont présentés en détail au paragraphe 5.2.3. Les chercheurs ont constaté que, de tous les dispositifs d'avertissement sonore mis à l'essai, aucun ne générant un niveau sonore suffisant pour alerter toutes les personnes qui ont participé aux essais, dans toutes les combinaisons étudiées de la vitesse du train et du véhicule. (Les dispositifs étaient réglés pour fonctionner à leur niveau sonore moyen.) Le manque de puissance du signal sonore variait de 2 dB, lorsque les trains et les véhicules automobiles circulaient à 30 mi/h, à 22 dB, dans le cas où les trains et les véhicules automobiles circulaient à 70 mi/h. L'étude a conclu que :

Les klaxons de locomotives [tels qu'ils sont conçus présentement] ne peuvent alerter à coup sûr les automobilistes lorsque soit le train, soit le véhicule automobile se déplace à [plus de] 50 mi/h.

D'autres chercheurs sont arrivés à des conclusions semblables après avoir mené des études sur les sirènes de véhicules d'urgence. Ainsi, Caelli et coll. [1980] ont démontré, par des essais menés à bord de véhicules, la difficulté qu'ont les conducteurs à localiser la sirène. L'erreur la plus courante était de surestimer sa distance, peu importe la direction dont elle provenait. Certains conducteurs ont même cru que la sirène était deux fois plus éloignée qu'elle ne l'était réellement. Une autre erreur fréquente était de croire que la sirène précédait le véhicule alors qu'elle le suivait (ou vice versa). Pour être efficace, le signal d'une sirène (comme celui d'un klaxon de locomotive) doit surmonter le bruit masquant de la route, de la radio et des ventilateurs de l'auto, et vaincre les techniques modernes d'insonorisation des véhicules. Skeiber et coll. [1977] ont évalué, pour le compte du Department of Transportation (DOT) des États-Unis, l'affaiblissement moyen d'un signal compris dans la gamme de fréquences efficaces d'une sirène, à travers la carrosserie d'une voiture dont toutes les fenêtres sont fermées et où règne un bruit masquant typique. Leurs analyses ont révélé que la sirène ne donne un avertissement efficace qu'à une distance maximale de 8 à 12 m (26 à 39 pi), aux carrefours urbains. La situation s'améliorait légèrement aux carrefours de banlieue et sur les routes rectilignes. Le rapport du DOT concluait que les sirènes ne pourraient jamais constituer des dispositifs d'avertissement efficaces.

2.2.2 Études sur la capacité des avertissements sonores à prévenir les accidents

Des études de données accidentologiques ont montré que, malgré les limites des dispositifs d'avertissement sonore, l'élimination complète du recours aux klaxons de locomotives à certains passages à niveau nuit à la sécurité. La FRA [U.S. DOT, 1990] a publié les résultats d'une étude chronologique qui a porté sur les accidents survenus aux passages à niveau de la Florida East Coast Railway Company et de la CSX visés par l'abolition du sifflement des trains décrétée par la Floride. La FRA [U.S. DOT, 1995] a ensuite publié les résultats d'une étude portant sur le même sujet, menée région par région à la grandeur des États-Unis. Cette étude indique qu'aux passages à niveau où le sifflement a été aboli (plus de 2 000), les accidents ont augmenté.

La FRA a par ailleurs constaté une diminution des accidents lors de la levée de l'abolition du sifflement aux passages à niveau où l'abolition avait été permise. Cette diminution était plus ou moins importante. Ainsi, elle atteignait 69 % en Floride, mais 12 études de cas menées dans huit États autres que la Floride ont révélé un recul moyen de 38 % du nombre d'accidents. Ces résultats valaient aussi bien pour les passages à niveau où l'abolition du sifflement visait seulement les trains de nuit que pour ceux où l'abolition visait tous les trains.

À l'occasion d'une mise à jour récente [U.S. DOT, 2000] de son étude nationale, la FRA a noté que les données relatives à la région de Chicago posent problème (voir le tableau 1). Comme on peut le voir, une augmentation moyenne normalisée de 100 % du nombre d'accidents est attribuée à l'abolition du sifflement (à l'échelle de tout le pays, région de Chicago non comprise). Mais comme l'indiquent d'autres parties du rapport, si on ne tient compte que des passages à niveau complètement automatisés (c.-à-d. munis de barrières) – car l'abolition du sifflement ne vise que ce type de passages à niveau – et si on utilise des données plus récentes, l'augmentation moyenne n'est plus que de 66 %.

Transports Canada [1995] a aussi mené une étude sur les incidences de l'abolition du sifflement des trains sur la sécurité, à environ 400 passages à niveau au Canada. Mais en raison du faible nombre d'accidents, les chercheurs ont eu de la difficulté à établir des prévisions statistiquement significatives. Ils ont malgré tout constaté que le fait d'abolir le sifflement à un passage à niveau non pourvu de barrières, sans compenser par d'autres mesures de sécurité, entraînait une hausse de 24 % à 82 % du taux de collisions de véhicules et une augmentation de 50 % du taux d'accidents mettant en cause des piétons aux passages à niveau. Ces résultats valent pour la période avant 1989, année où Transports Canada a modifié ses règles régissant les conditions d'abolition du sifflement. L'analyse des données relatives à la période suivant 1989 (de 1989 à 1995) n'a révélé aucune incidence statistiquement significative sur le risque associé à un passage à niveau – la variation des taux d'accidents allait d'une diminution de 70 % à une augmentation de 47 %. Quant aux résultats relatifs aux passages à niveau pourvus de barrières, ils différaient de ceux obtenus aux États-Unis : au Canada, l'abolition du sifflement n'a eu aucun effet sur le risque d'accident aux passages à niveau pourvus de barrières.

Les résultats des études sur l'incidence de l'abolition du sifflement des trains sur la sécurité sont difficilement conciliables avec ceux des études sur les klaxons de locomotives et les sirènes de véhicules d'urgence. En ce qui a trait aux essais réalisés par le NTSB à l'aide de klaxons émettant des signaux conformes au niveau sonore réglementaire de 96 dBA à 30,5 m (100 pi),

nous observons que les dispositifs d'avertissement sonore de la plupart des trains sont réglés à une puissance supérieure aux 96 dBA réglementaires. Quoiqu'il en soit, tous s'entendent généralement pour dire que les dispositifs d'avertissement sonore ont des limites et que l'on ne peut s'y fier en toutes circonstances. Il peut sembler vain de tenter d'expliquer pourquoi un klaxon est efficace. Mais il est important de savoir dans quelles situations, et pourquoi, les klaxons sont efficaces, pour définir les caractéristiques optimales d'un klaxon de locomotive dans ces situations où il est efficace. Il est également nécessaire de bien cerner les limites du klaxon, afin d'évaluer la possibilité de modifier l'environnement et/ou d'élaborer un programme de sensibilisation du public, dans les cas où il ne peut être efficace.

Tableau 1 Comparaison des accidents aux passages à niveau avec et sans abolition du sifflement des trains aux États-Unis

Groupe APF*	Sans abolition du sifflement			Abolition de 5 ans du sifflement			% d'augmentation avec l'abolition	Augmentation normalisée (en %)
	Nombre de passages à niveau	Accidents en 5 ans	Taux d'accident	Nombre de passages à niveau	Accidents en 5 ans	Taux d'accident		
A	29 132	683	0,0234	90	5	0,0556	137,0	113
B	35 173	1 287	0,0366	104	7	0,0673	83,9	80
C	20 022	1 390	0,0694	141	18	0,1277	83,9	108
D	20 477	1 945	0,0950	142	26	0,1831	92,8	120
E	11 429	1 661	0,1453	118	38	0,3220	121,6	131
F	6 580	1 207	0,1834	111	47	0,4234	130,8	133
G	5 780	1 422	0,2460	124	40	0,3226	31,1	35
H	3 477	1 048	0,3014	103	53	0,5146	70,7	66
I	3 039	1 101	0,3623	100	73	0,7300	101,5	93
J	1 572	734	0,4669	63	91	1,4444	209,4	129
Total	136 681			1 096	Moyenne pour les 10 groupes >		104,23	99,79

Données pour l'ensemble du pays, à l'exclusion de Chicago, pour la période de 1989 à 1993 et pour tous les types de passages à niveau automatisés. Les données touchant les collisions latérales entre trains, les collisions avec des véhicules sans conducteur et les accidents mettant en cause des piétons sont exclues.

* Les chercheurs ont eu recours à une formule statistique (*Accident Prevention Formula*) pour classer les passages à niveau selon leur niveau de risque. (N.D.T.)

Source : [U.S. DOT, 2000]

2.2.3 Inconnues examinées dans le présent rapport

Notre recherche documentaire nous a amenés à penser que l'efficacité des klaxons de locomotives existants, telle que démontrée empiriquement, dépend du fait que les conducteurs :

- a) soit sont alertés malgré des rapports signal/bruit (S/B) plus faibles que ce que beaucoup croyaient;
- b) soit ont besoin d'un délai (d'une distance) d'avertissement plus faible que ce que beaucoup croyaient.

Outre la question essentielle de l'efficacité d'un dispositif d'avertissement sonore, notre recherche documentaire préalable a révélé des faiblesses dans la caractérisation des klaxons de locomotives. Ainsi, selon les mesures acoustiques effectuées par Travail Canada (Trav)

[Seshagiri et Stewart, 1991], le SPL d'une locomotive se déplaçant à 40 mi/h était toujours inférieur au SPL mesuré à la même distance d'une locomotive fixe. Ce résultat soulève la question de l'effet de la vitesse du train sur le niveau sonore du signal émis par le klaxon. Toujours en ce qui a trait à l'influence de la vitesse, le rapport d'enquête du BST sur l'accident de Tecumseh [BST, 1996] soulevait la question de savoir si la qualité de l'avertissement donné par le klaxon est influencée par son emplacement sur la locomotive, lorsque le train circule à grande vitesse. Évaluant les causes de l'accident, le BST notait :

L'inefficacité du klaxon de la locomotive en tant que dispositif d'avertissement est le résultat d'une combinaison de facteurs liés à la capacité du klaxon d'attirer l'attention et de projeter le son vers l'avant dans les présentes circonstances.

Les questions de la détection du signal et du caractère plus ou moins pressant qu'il peut revêtir ont été l'objet d'expériences menées au laboratoire d'acoustique du département de psychologie de l'Université Queen's. Les résultats sont commentés au chapitre 3. Pour définir les caractéristiques acoustiques d'un klaxon ainsi que l'influence combinée de l'emplacement du klaxon et de la vitesse du train sur l'efficacité du klaxon, nous avons effectué des mesures acoustiques au passage de trains en service payant. Celles-ci sont discutées au chapitre 4. Quant à la question du délai et de la distance d'avertissement, elle est abordée au chapitre 5, qui porte sur l'évaluation de la performance des klaxons sous l'angle de la sécurité.

3 DÉTECTION ET URGENCE APPARENTE DU SIGNAL

3.1 Données tirées de la documentation

Lorsque des normes portant sur des dispositifs d'avertissement sonore existent, celles-ci sont très rigoureuses. Témoin, les recommandations de l'American National Standards Institute (ANSI) [1978] concernant les signaux d'évacuation d'urgence, qui stipulent ce qui suit :

[TRADUCTION]

- *Le niveau sonore du signal doit dépasser de 10 dB le niveau maximal de bruit de fond type provenant de toutes sources et d'au moins 75 dB ce niveau, là où l'évacuation est jugée essentielle.*
- *La fréquence fondamentale doit être sous les 1 000 Hz et le taux de modulation doit être inférieur à 5 Hz.*
- *Si des niveaux sonores de plus de 115 dB sont nécessaires, il y a lieu d'envisager l'utilisation de signaux d'avertissement visuels.*

Les autres normes ne précisent pas de niveau sonore, mais insistent néanmoins sur l'importance de rapports S/B élevés. Dans leurs travaux, Byrne et Driscoll [1998] résument la norme internationale ISO 7731 1986 qui définit les critères qui s'appliquent à la reconnaissance des signaux auditifs de danger, particulièrement dans les ambiances très bruyantes. Cette norme présente des seuils d'audibilité du signal auditif fondés sur des relevés du niveau acoustique pondéré en A et des analyses par bandes d'un octave et d'un tiers d'octave. Sur l'échelle de pondération en A, le signal doit être d'au moins 15 dB supérieur au niveau de bruit ambiant. À l'analyse par bandes d'un octave, le signal de danger doit être d'au moins 10 dB supérieur au seuil d'audition de l'employé, compte tenu de l'effet de masquage, dans au moins une bande d'un octave comprise entre 300 et 3 000 Hz. Si l'analyse porte plutôt sur les bandes d'un tiers d'octave, le signal de danger doit être d'au moins 13 dB supérieur au seuil d'audition du son masqué, dans une ou plusieurs bandes d'un tiers d'octave situées dans la plage de fréquences de 300 à 3 000 Hz. Le signal d'avertissement sonore doit se situer dans la plage de fréquences de 300 à 3 000 Hz et être suffisamment puissant sous les 1 500 Hz pour alerter les personnes atteintes d'une perte d'audition. Les caractéristiques temporelles du signal de danger sont également abordées. La norme ISO préconise en outre l'utilisation de signaux impulsionnels plutôt que de signaux continus, et elle précise une plage de fréquences de récurrence entre 0,2 et 5 Hz.

Abrams et Lipscomb [1996] notent que l'oreille humaine est capable de détecter des signaux sonores d'une fréquence variant de 2,5 à 3 kHz, à un SPL de 6,5 dB, tandis que pour percevoir un signal à large spectre, ce dernier doit dépasser de 3 à 8 dB le seuil de détection. S'appuyant sur les travaux de Skeiber et coll. [1977] et de Fidell [1978], Abrams et Lipscomb font remarquer que pour qu'un signal d'alerte soit vraiment efficace, il doit dépasser de 9 à 10 dB le seuil de détection.

Skeiber et coll. [1977 et 1978] ont soumis 24 conducteurs possédant un permis de conduire à divers scénarios de conduite représentant des situations réelles dans un simulateur. Au cours de

l'expérience, les sujets étaient mis en présence de sons de sirènes de plus en plus forts, jusqu'à ce qu'ils appliquent les freins. Les rapports S/B correspondant au moment de la réaction ont été notés dans chaque cas. Le rapport S/B moyen pour la sirène la plus facilement détectée était de 12,4 dB. Les auteurs ont noté que le seuil de *réaction* (qui témoigne de la perception du signal et de l'amorce d'une réaction) était en moyenne de 9 dB supérieur au seuil de la simple *détection*. Les rapports S/B associés au niveau de réaction des quatre sujets âgés de 60 ans et plus dépassaient de seulement 1,1 dB ceux des 20 sujets âgés de moins de 29 ans. Après comparaison des divers sons de sirènes, le signal alternant entre sons graves et aigus s'est avéré le moins efficace. Les auteurs croient que cela est dû au masquage des basses fréquences par le bruit de fond à l'intérieur du véhicule. Ils ont donc conclu que les fréquences situées sous les 1 000 Hz étaient, en grande partie, non perçues.

Fidell et Teffeteller [1981] ont évalué l'effet du niveau de concentration sur la tâche sur la détection de signaux sonores. Le rapport S/B correspondant à la détection des sons perturbateurs en présence de bruit de fond était de 14,2 dB en moyenne (pour la bande d'un tiers d'octave associée au plus grand écart). Le rapport S/B moyen établi lors d'expériences antérieures de détection en l'absence de tâches sollicitant l'attention était de 3,6 dB.

3.1.1 Détection d'un signal lorsque le rapport S/B est négatif

Rapoza et coll. [1999] expliquent les résultats contradictoires des études sur l'efficacité des klaxons en faisant intervenir un modèle théorique de l'efficacité des sifflets aux passages à niveau. Ils se sont basés sur une thèse inédite de Wilson [1983] pour mettre au point un modèle de détection du signal émis par les klaxons de locomotives. Selon Wilson, le rapport S/B nécessaire doit être atteint dans au moins deux bandes d'octave pour que le signal du klaxon puisse être reconnu. Rapoza et coll. ont mené leurs analyses en supposant que le rapport S/B requis était dépassé dans au moins cinq bandes d'un tiers d'octave. Selon les seuils S/B nécessaires pour expliquer les résultats des études antérieures sur l'efficacité des klaxons de locomotives menées à partir de données accidentologiques, pour une probabilité de détection de 50 % des signaux sonores, le rapport S/B doit être de +5,2 dB aux passages à niveau automatisés, et de -5,2 dB aux passages à niveau non automatisés². De là, les auteurs ont conclu que certains types de klaxons pouvaient satisfaire aux distances d'avertissement compatibles avec les normes de conception des routes en matière de temps de réponse en freinage (2,5 s) et de taux de freinage (environ 0,35 g). Leur explication repose donc sur la détectabilité des signaux malgré un rapport S/B négatif.

Nous avons trouvé des études confirmant la détectabilité des signaux auditifs en présence de rapports S/B négatifs. Ainsi, Corliss et Jones [1976] évoquent un certain nombre d'expériences antérieures démontrant que l'oreille constitue un filtre efficace, capable de différencier un signal structuré du bruit de fond, et ce, même lorsque l'intensité de ce dernier dépasse d'un ordre de grandeur celle du signal structuré. Les auteurs ont élaboré un modèle fondé sur les théories de la communication du comportement de l'oreille lorsqu'elle détecte des signaux en présence d'un

² Nous remarquons que le bruit de fond pour les deux types de passages à niveau était associé à un véhicule roulant à 50 km/h. En ce qui concerne les collisions qui surviennent aux passages à niveau automatisés et qui mettent en cause des conducteurs qui, après s'être arrêtés, décident de traverser le passage à niveau, le bruit de fond serait inférieur et, du même coup, le rapport S/B accru.

bruit de fond masquant. Ainsi, autant l'oreille humaine est efficace pour détecter les sons situés dans la plage de 1 à 6 kHz, autant elle est efficace pour filtrer le bruit dans cette plage de fréquences. Les auteurs démontrent que leur modèle est bien ajusté aux données expérimentales d'études antérieures qui donnent les rapports S/B de détection en fonction de la plage des fréquences audibles à l'oreille humaine (les données font état de rapports S/B allant de -15 à -30 dB pour la plage de fréquences comprises entre 100 Hz et 10 kHz).

La figure 1 compare le seuil d'audition de l'oreille humaine en l'absence de bruit, au seuil d'audition (tel que dérivé du modèle de Corliss) de signaux structurés en présence d'un bruit masquant à large spectre³.

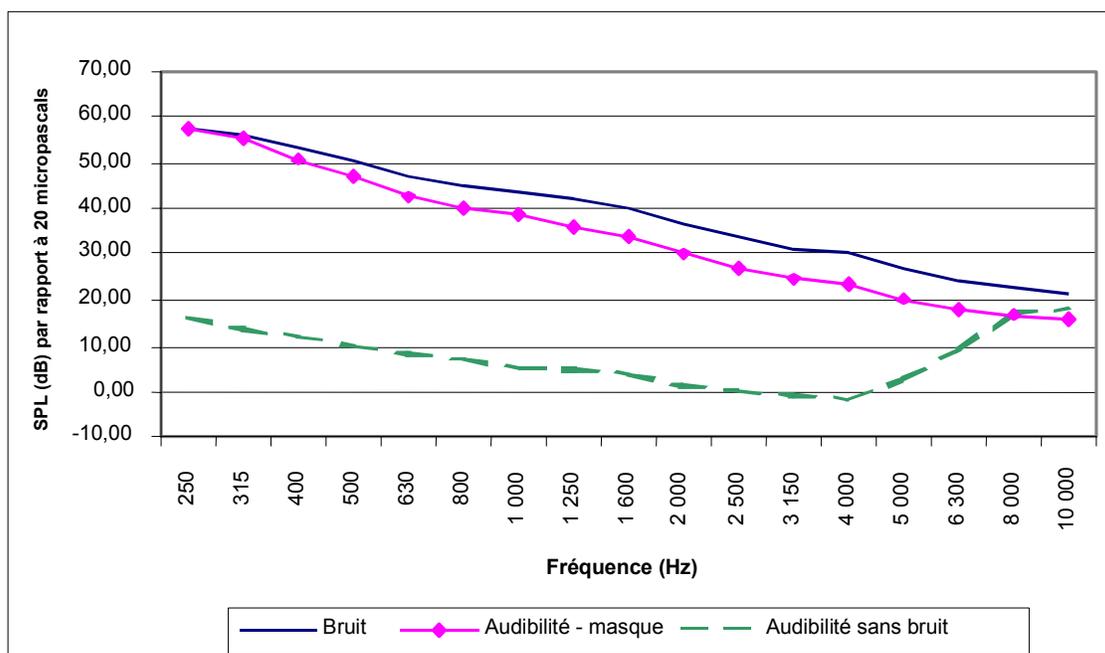


Figure 1 Effet du bruit de fond sur l'audibilité (modèle de Corliss)

Il est important de noter que le modèle de Corliss définit l'audibilité, qui est clairement dépendante de la fréquence. Un rapport S/B de 0 dB à la fréquence centrale de la bande d'un tiers d'octave axée sur la fréquence 250 Hz se situerait au seuil d'audibilité prédit par le modèle, tandis qu'un rapport S/B de -6 dB se situerait au seuil d'audibilité des fréquences supérieures à 1,6 kHz. Ces résultats sont semblables à ceux rapportés par Zwicker et Fastl [1990] dans leur étude portant sur la détection des sons masqués par un bruit dans des largeurs de bandes critiques (les résultats des travaux de Zwicker étaient -2 dB, -3 dB et -5 dB, ou 250 Hz, 1 000 Hz et 4 000 Hz, respectivement). Aucun de ces modèles ne s'attarde aux caractéristiques des bruits non linéaires, comme ceux que l'on retrouve à l'intérieur d'une automobile où l'influence du

³ Aux fins de l'application du modèle de Corliss et Jones, nos mesures de signaux et de bruit étaient prises par rapport à un niveau de référence de 20 micropascals et non par rapport au seuil d'audibilité adopté par les auteurs. Nous croyons que leur affirmation selon laquelle il faut ajouter le seuil d'audition au S/B ne doit pas être interprétée à la lettre, mais plutôt comme une indication que cela constitue une contrainte supplémentaire.

phénomène de masquage vers les hautes fréquences⁴ pourrait être pertinente. Cet effet est étudié plus en détail au paragraphe 3.2.2.

3.1.2 Niveaux-seuils d'intensité

Bien que le modèle de Corliss prévoie la détection de signaux sonores malgré un rapport S/B négatif pour la plupart des fréquences, il suppose que pour être réellement perçu et compris, un signal sonore multifréquence doit être d'une intensité égale ou supérieure à une conversation normale entre deux interlocuteurs à un mètre de distance (soit 65 dB dans un environnement calme). Ainsi, même si un signal sonore de 1 kHz serait au seuil d'audibilité avec un rapport S/B négatif causé par le bruit de fond supposé, il reste que le rapport S/B devrait être d'au moins +12 dB pour qu'il soit perçu et qu'il attire l'attention de l'auditeur.

À noter que si cette deuxième hypothèse était juste, les klaxons de locomotives alerteraient rarement, sinon jamais, les conducteurs de véhicules routiers. Nous convenons toutefois qu'il est nécessaire de définir un rapport S/B minimal et un SPL minimal pour évaluer et/ou prévoir l'efficacité d'un klaxon. Dans une ambiance calme, le seuil du SPL devient le critère déterminant. Par exemple, les niveaux de bruit masquant à l'intérieur d'un véhicule tombent sous les 40 dB pour les fréquences au-delà de 1 kHz. Si l'on suppose qu'un niveau sonore équivalent à 65 dB est nécessaire pour attirer efficacement l'attention dans une ambiance calme, alors des niveaux de détection à faible rapport S/B à l'intérieur de véhicules n'auraient pas de sens. La question est de savoir si un niveau sonore de 65 dB ou plus est nécessaire pour un signal d'alerte.

Il existe des rapports de recherche pour étayer la réduction des niveaux sonores d'alerte. Ainsi, des expériences effectuées avec des systèmes d'alarme-incendie ont révélé qu'un niveau sonore de 55 dB ou moins était efficace. Nober et coll. [1983] ont mené trois séries d'expériences avec des détecteurs de fumée/d'incendie domestiques. Pour la première expérience, 30 sujets endormis ont été soumis à des alarmes sonores. Les 30 sujets avaient été répartis en trois groupes de dix, chaque groupe étant soumis à des alarmes de 55, 70 et 85 dB, respectivement. En moyenne, les sujets exposés à l'alarme de 55 dB se sont réveillés en 14 secondes, ceux qui étaient exposés à l'alarme de 70 dB, en 10 secondes, et ceux qui étaient exposés à l'alarme de 85 dB, en 7 secondes. Au cours d'une deuxième expérience, des signaux sonores de 55 et 70 dB ont été utilisés en présence d'un bruit ambiant de 51 dB produit par un climatiseur. Les membres du groupe soumis au signal d'alarme de 55 dB se sont réveillés en 43 secondes, tandis que ceux exposés au signal sonore de 70 dB se sont réveillés en 19 secondes. Donc, même si les résultats confirment l'avantage d'utiliser un signal sonore plus puissant, le signal sonore le plus faible (55 dB) est quand même efficace. De plus, les travaux expérimentaux de Haas et Edworthy [1996] ont révélé que le seuil d'alerte des signaux d'alarme est de 40 dBL. Ces travaux sont présentés plus en détail au paragraphe 3.3.

Les données expérimentales colligées par Aurelius et Korobow [1971] tendent à confirmer l'existence d'un niveau S/B d'alerte dans une gamme assez large de conditions. Dix-sept sujets

⁴ Le masquage vers les hautes fréquences est un phénomène auditif connu depuis de nombreuses décennies. Il s'agit du phénomène par lequel un bruit à basses fréquences masque plus facilement un son pur que le bruit formé de hautes fréquences. L'effet défie la logique puisque le seuil d'audition des basses fréquences est plus élevé que celui des hautes fréquences.

ont participé à des séances de conduite réelles pendant lesquelles des enregistrements de différents klaxons étaient diffusés par un haut-parleur extérieur. Les signaux sonores étaient d'abord diffusés pendant 2,5 secondes, puis à des intervalles et niveaux de puissance aléatoires (échelons de 5 dB). Les données, recueillies à différentes vitesses pour trois types de véhicules, ont ensuite été analysées. Les chercheurs se sont surtout concentrés sur le niveau sonore du signal (mesuré à l'extérieur du véhicule) auquel le conducteur percevait celui-ci. Le niveau d'alerte moyen du signal mesuré à l'extérieur, était d'environ 87 dB. Si l'on admet des pertes d'insertion⁵ de 30 dB, on peut penser qu'un signal de 57 dB était suffisant pour la moitié des sujets, et que nombre d'entre eux ont perçu le signal à des niveaux encore plus faibles (l'écart type était de 6 dB). La figure 2 présente une interprétation des résultats d'Aurelius et de Korobow pour trois plages de vitesses, en présumant que les données suivaient une distribution normale.

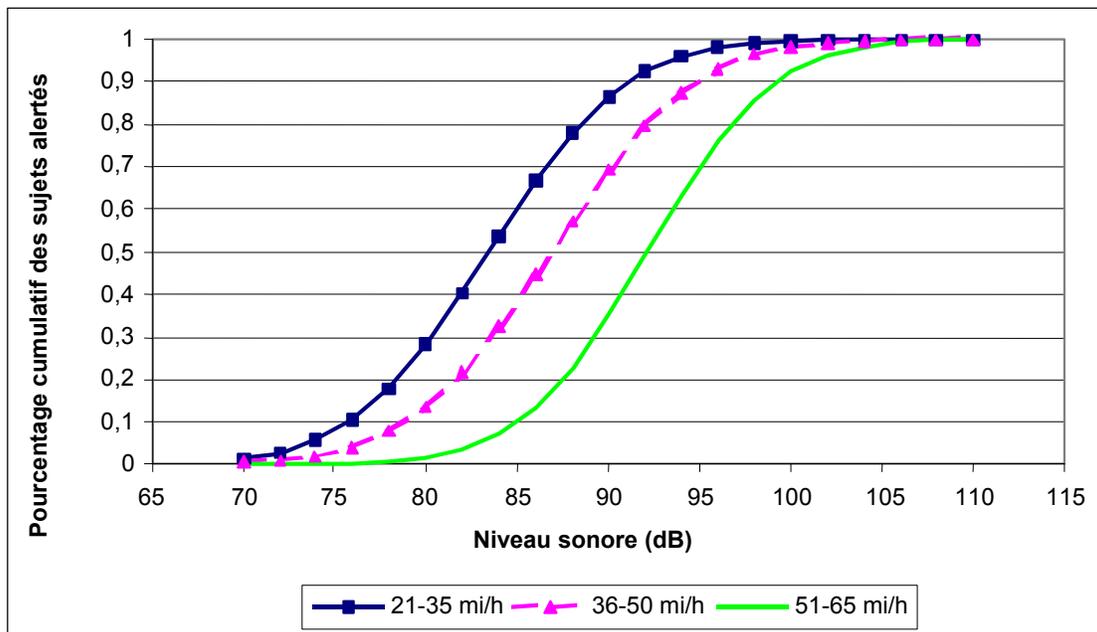


Figure 2 Niveaux d'alerte sonores nécessaires à l'extérieur des véhicules selon Aurelius

La distribution des données n'a pas été précisée, mais la plage des données rapportées et leur utilisation laissent croire à une distribution normale. Nous remarquons également que la distribution des réactions, dérivée par des chercheurs en acoustique lors d'essais sur la réaction aux signaux d'alerte, suit elle aussi une distribution normale [Green et Swets, 1966].

⁵ La perte d'insertion n'a pas été mesurée, mais une valeur de 30 dB est représentative des mesures prises par Rapoza et coll. [1999] dans le spectre de fréquences des klaxons.

Autres constatations pertinentes d'Aurelius :

- la musique diffusée par la radio ajoutait environ 4 dB aux niveaux de détection, alors que la conversation ajoutait 0,5 dB;
- les niveaux de détection les plus bas ont été enregistrés dans les véhicules les plus récents et les plus silencieux.

Le fait que le niveau de détection le plus bas ait été obtenu dans le véhicule le plus silencieux est important, puisqu'il s'agissait d'un véhicule de 1970 et que les modèles d'aujourd'hui sont encore plus silencieux. De plus, la perte d'insertion, pour le signal d'un klaxon, dépend des vitrages du véhicule, qui n'ont pas beaucoup changé depuis cette époque. Le bruit du moteur, des pneus et du vent a été réduit grâce à une meilleure insonorisation du bas de caisse et par l'amélioration de l'aérodynamisme des véhicules. Ainsi, les niveaux de détection des signaux, dans les nouveaux véhicules mieux insonorisés, devraient être inférieurs à ceux observés dans les véhicules des années 1970.

Pour l'ensemble des essais, les vitres des portières étaient fermées. La vitesse de fonctionnement du ventilateur, l'une des variables clés, n'a pas été documentée. Le véhicule le plus récent était équipé d'un climatiseur (mais il n'est pas précisé si ce dernier fonctionnait pendant les essais). Les essais s'étant déroulés dans des conditions de conduite normale, nous avons supposé que le ventilateur fonctionnait dans tous les cas.

3.2 Expériences de détection de signaux sonores

Même si le modèle acoustique de Corliss et Jones est directement applicable à la détection des signaux à l'intérieur d'un véhicule, il s'appuie sur des données de bruit à répartition uniforme (bruit blanc). Le phénomène de masquage vers les hautes fréquences, selon lequel le bruit basse fréquence peut masquer des signaux haute fréquence, est largement accepté. L'Organisation internationale de normalisation (ISO) recommande un masquage vers les hautes fréquences de -7,5 dB par octave [ISO, 1986]. Comme on peut le constater dans la figure 3, la valeur de masquage de -7,5 dB/octave se rapproche beaucoup des caractéristiques de bruyance des véhicules mesurées par le Volpe Center [Rapoza et coll., 1999]. Cependant, les études de détection des signaux sonores en présence de caractéristiques de bruit décrivant une courbe à pente négative ont soulevé la question à savoir si la valeur de 7,5 dB est trop prudente [Robinson et Casali, 1999]. Nous avons donc entrepris des expériences en laboratoire pour étudier les seuils de détection de signaux sonores lorsque le bruit diminue, et nous avons également mis à l'essai différents modèles d'audition humaine.

3.2.1 Résultats des expériences

L'expérience de détection des signaux sonores visait à évaluer les rapports S/B correspondant aux niveaux de détection de sons purs dans des conditions de bruit qui ressemblent au bruit de fond présent à l'intérieur d'un véhicule. Pour les besoins de l'expérience, le niveau de bruit à l'intérieur du véhicule était la moyenne du niveau de bruit enregistré dans les 14 véhicules étudiés par Rapoza et coll. [1999]. La courbe du SPL du bruit en fonction de la fréquence affiche une pente négative, comme illustré à la figure 3.

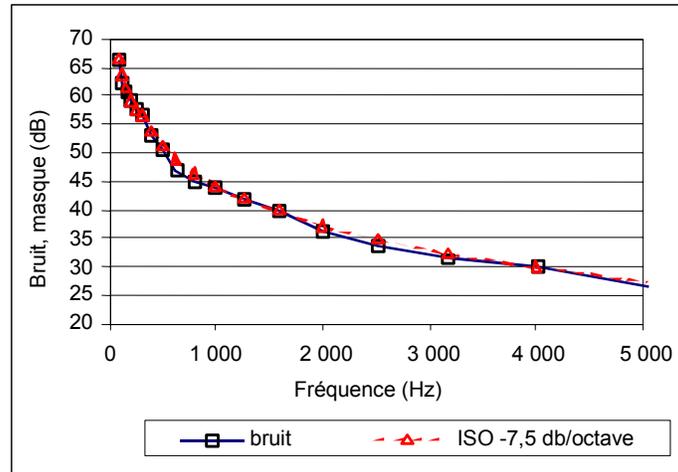


Figure 3 Bruit produit et courbe de l'ISO relative au masquage

La méthode et les résultats de l'expérience sont présentés à l'annexe D. Les rapports S/B obtenus ont été inférieurs à ceux attendus (résultats de -6 à -12 dB par rapport aux 0 à -6 dB attendus). Les résultats obtenus en laboratoire ont été examinés de plus près au cours de quelques essais à bord d'un véhicule. Ces essais mettaient en jeu un véhicule dont le moteur tournait au ralenti et un signal sonore à une seule hauteur tonale, diffusé à l'extérieur du véhicule. Les résultats démontrent un rapport S/B de forme similaire, mais pas aussi faible que ceux des expériences en laboratoire.

La plus grande variation temporelle du bruit produit en laboratoire pourrait expliquer les faibles seuils de détection obtenus. Le bruit est caractérisé par une certaine variation aléatoire dans le temps. Le bruit de fond utilisé pendant l'expérience correspondait approximativement au bruit produit par des automobiles roulant à 50 km/h. La hauteur tonale du signal était constante, tandis que le bruit de fond variait en intensité pendant de brèves périodes. En comparant le signal sonore produit par ordinateur et un véritable signal sonore enregistré à l'intérieur d'un véhicule, nous avons constaté que pendant les 50 ms que durait l'émission du signal simulé, la variation du SPL dans des bandes d'un tiers d'octave était beaucoup plus importante que celle du signal enregistré (environ +/-6 dB comparativement à +/-3 dB pour le signal réel). Or, l'oreille humaine est capable de détecter des signaux d'une durée de 20 ms; les variations temporelles du bruit produit en laboratoire pourraient donc expliquer les faibles rapports S/B obtenus dans le cadre de notre expérience.

L'explication proposée pour les seuils de détection inférieurs du bruit simulé par rapport au bruit réel met en lumière l'importance d'une autre caractéristique acoustique : la nécessité d'une hauteur tonale constante pour que le signal puisse être détecté dans un milieu où le bruit varie dans le temps. Il faut également noter que la musique et la voix sont caractérisées par des variations plus intenses à court terme que les composantes de base du bruit d'un véhicule en mouvement.

Les essais réalisés à l'intérieur du véhicule ont également permis de constater l'importance de l'orientation et de la position de la tête du conducteur. Les ondes stationnaires étaient perceptibles pour la hauteur tonale de 562 Hz, de sorte qu'un léger déplacement latéral de la tête

du conducteur changeait considérablement le rapport S/B de détection. Des mesures prises avec un sonomètre ont confirmé qu'un mouvement latéral de 15 cm de la tête entraînait une fluctuation de 20 dB de l'intensité du signal. La détection de signaux de fréquences supérieures à 2 500 Hz était considérablement influencée par l'orientation de la tête, fait qui a également été vérifié par les essais en laboratoire. Ces derniers ont débouché sur deux conclusions :

1. Des mesures distinctes prises à l'intérieur d'un même véhicule, peuvent produire des résultats significativement différents, ce qui rend difficile la formulation de conclusions générales.
2. Un signal composé de plusieurs fréquences a davantage de chances d'être détecté qu'un signal composé de quelques fréquences seulement.

La figure 4 illustre les résultats combinés des essais réalisés en laboratoire et à l'intérieur d'un véhicule.

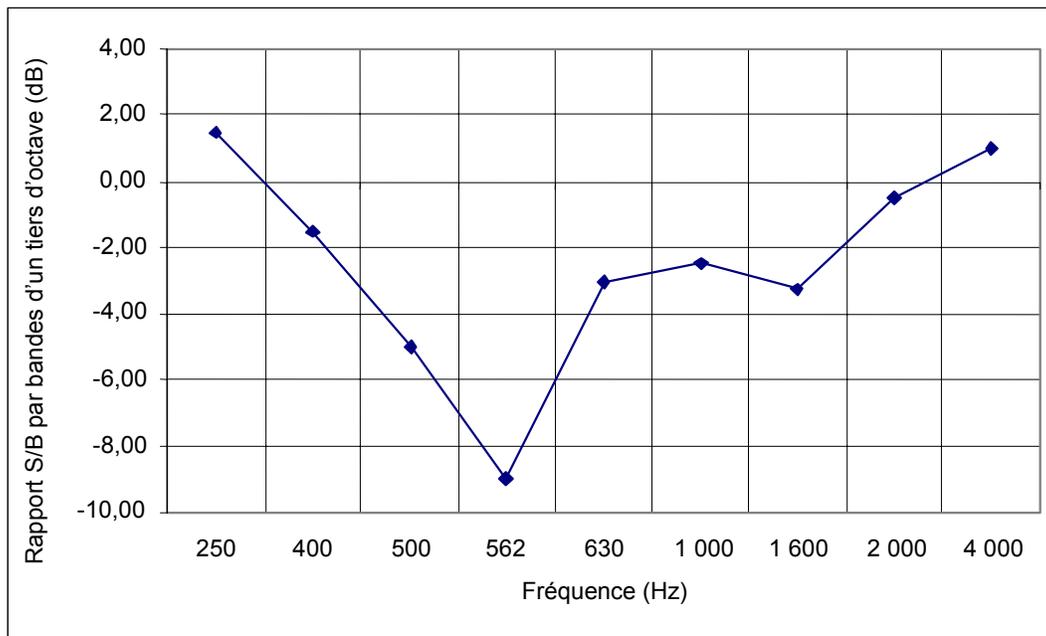


Figure 4 Seuil de détection moyen observé lors d'essais en laboratoire et en véhicule

Par rapport au modèle de Corliss et aux données de Zwicker (dont il a été question au paragraphe 3.1.1), deux observations ressortent :

1. Les niveaux S/B de détection sont meilleurs que prévu aux basses fréquences, mais pires aux hautes fréquences.
2. La fréquence 562 Hz semble correspondre à une «valeur idéale».

Les résultats peuvent s'expliquer de plusieurs façons. Les fréquences hautes pourraient être touchées par un effet de masquage depuis les basses fréquences. Le niveau S/B de détection

des signaux meilleur que prévu aux basses fréquences, pourrait s'expliquer par la combinaison de plusieurs facteurs. Robinson et Dadson [1956] ont démontré que des courbes d'intensité identiques s'amortissaient de 5 dB à 500 Hz, dans la plage de 40 à 70 dB, par rapport à leur forme au seuil d'audibilité. Le déphasage interauriculaire de l'audition binaurale favorise la détection des basses fréquences (Zwicker et Fastl, 1990). Or, le montage de l'expérience comportait un signal latéral et un bruit enveloppant. Le déphasage interauriculaire particulier associé aux différentes hauteurs tonales lors d'essais en laboratoire (et dans le véhicule) ne représente qu'une des multiples orientations possibles de la tête. La position de la tête et le déphasage interauriculaire connexe sont appelés à varier considérablement dans des situations réelles d'avertissement par un signal de klaxon; c'est pourquoi nous accordons moins d'importance aux niveaux S/B de détection obtenus aux basses fréquences.

3.2.2 Sélection d'un modèle de détection des signaux sonores

Les résultats des expériences ont confirmé qu'il est possible de détecter des signaux sonores à des rapports S/B négatifs, dans le milieu sonore d'un véhicule. Toutefois, le lien détection-fréquence diffère de celui prévu par le modèle de Corliss. Nous avons évalué d'autres modèles auditifs, dont le modèle de Lyon [Slaney, 1988], qui prévoit un masquage excessif par les basses fréquences. Quant au modèle *Detectsound* [Laroche et coll., 1991], il dérive un masque de la sommation des intensités équivalentes, mais il est trop complexe pour que nous puissions l'appliquer à nos travaux. Le premier modèle de Patterson [Patterson et Nimmo-Smith, 1980] donnait des résultats semblables à ceux prédits par le modèle de Corliss, tandis que son modèle ultérieur simplifié [Patterson et coll., 1982] prévoyait un masquage excessif par les basses fréquences. Nous avons décidé d'utiliser le premier modèle de Patterson, mais nous avons choisi des coefficients qui correspondent mieux à nos données. Il en résulte une forme de filtre qui se situe à mi-chemin entre les deux modèles de Patterson, tel qu'illustré à la figure 5 à 4 kHz. Notre modèle se présente comme suit :

$$P = k \int H(g)^2$$

où

$$H(g)^2 = \left[1 + \lambda g + a_2(\lambda g)^2 + a_3(\lambda g)^3 \right] e^{-\lambda g}$$

$$g = (f_1 - f_o) / f_o \quad (\text{facteur de fréquence normalisé pour la fréquence } f)$$

Nous avons établi le facteur d'atténuation sensible à la fréquence k , en ajustant la courbe des données de Moore [1990], de sorte que $k = 0,32834 + 252,34 / f_o$

Nous avons modifié la valeur du coefficient en exposant λ pour la plage des basses fréquences, la faisant passer de 20,7 à 14,5, et donné aux autres coefficients les mêmes valeurs que dans le modèle original de Patterson. Le seuil de détection prévu par le modèle en présence du bruit caractéristique de l'intérieur du véhicule est illustré à la figure 6.

Il se pourrait que dans certaines situations, l'audition binaurale accentue la détection des basses fréquences, comme nous l'avons observé dans nos expériences en laboratoire. Cependant, notre caractéristique de masque binaural théorique pour un signal émis à un angle de 90 degrés est

présentée à titre d'illustration. Nous avons utilisé le masque corrigé de Patterson dans la section de ce rapport portant sur l'efficacité de l'avertissement (chapitre 5).

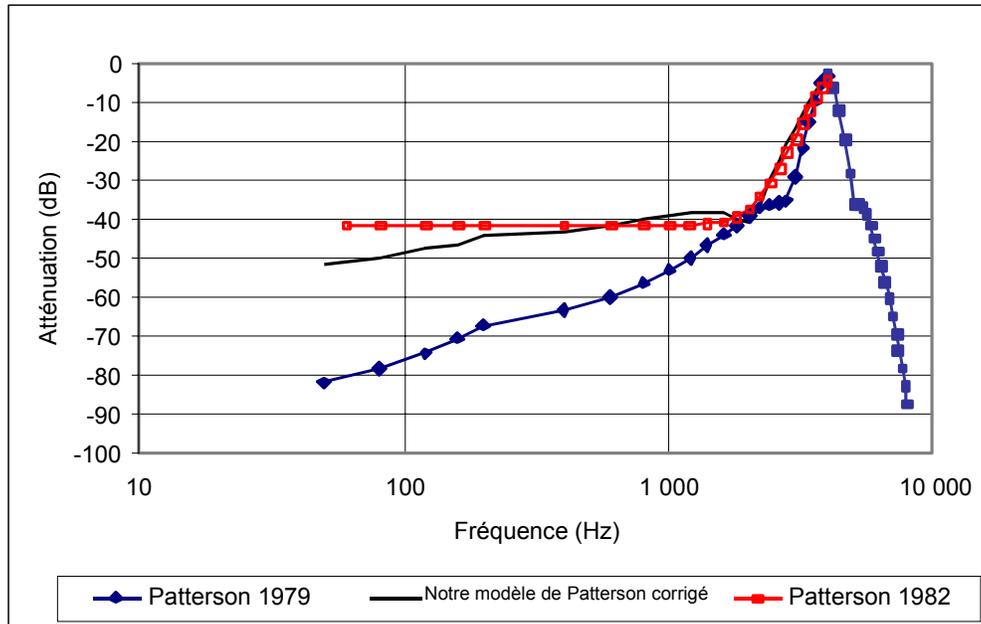


Figure 5 Comparaison de filtres auditifs à 4 kHz

3.2.3 Corrélation du modèle avec d'autres données

Comme il a été mentionné précédemment, Robinson et Casali [1999] ont réalisé des expériences de détection de signaux qui ont révélé que les recommandations de l'ISO en matière de masquage [ISO 7731, 1986] pourraient dénoter un excès de prudence. Nous avons évalué les données publiées par ces auteurs et comparé les seuils de masquage prévus par notre modèle avec ceux obtenus avec la méthode de l'ISO. Les essais de Robinson portaient sur la détection d'un signal de marche arrière dans un environnement très bruyant, par un sujet portant un dispositif de protection auditive de type serre-tête. Ces essais sont particulièrement pertinents puisque la perte d'insertion causée par le dispositif de protection de l'ouïe est plus prononcée que celle associée à l'intérieur d'un véhicule, mais le niveau de bruit est à peu près le même au lieu de détection. L'expérience de Robinson, qui a porté sur l'ensemble du spectre des pressions acoustiques, a mené à des taux de détection supérieurs à 90 %, à un rapport S/B de -16 dB, et de 65 %, à un rapport S/B de -24 dB. Le rapport de recherche contient toutefois suffisamment d'information pour que nous ayons pu dériver les SPL des bandes d'un tiers d'octave. Et nous avons utilisé ces données pour comparer notre modèle de masquage à la recommandation de l'ISO en matière de masquage.

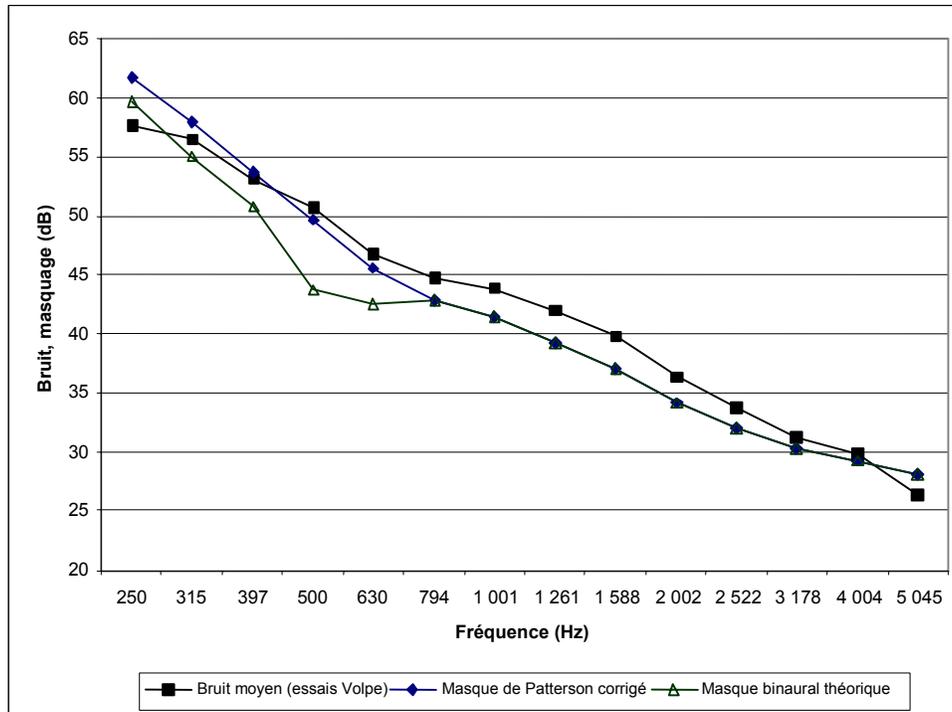


Figure 6 Caractéristiques de masquage dérivées - milieu sonore à l'intérieur d'un véhicule

Tableau 2 Comparaison des niveaux de masquage de l'ISO et du modèle de Patterson corrigé

1/3 d'octave (Hz)	Bruit extérieur	Bruit intérieur	Masque ISO	S/B 0,0 dBA		S/B -16,0 dBA	
				Signal extérieur	Signal intérieur	S/M (ISO)	S/M (Patterson corrigé)
250	80,1	59,3	63,1				
315	80,1	57,1	60,6				
400	80,1	52,7	58,1				
500	80,1	48,1	55,6				
630	80,1	43,7	53,1				
800	80,1	38,8	50,6				
1 000	80,1	36	48,1	92	47,9	-16,2	-5,2
1 250	80,1	37,3	45,6	96	53,2	-8,4	0,5
1 600	80,1	37,8	43,1	72	29,7	-29,4	-23,2
2 000	80,1	39,1	40,6	84	43	-13,6	-11,0
2 500	80,1	41,3	41,3	86	47,2	-10,1	-4,0
3 150	80,1	36,9	38,8	73	29,8	-25	-18,6
4 000	80,1	31,6	36,3	77	28,5	-23,8	-19,9
5 000	80,1	33,6	33,8	77	30,5	-19,3	-19,3

La deuxième colonne montre le bruit blanc extérieur et la troisième colonne, le bruit à l'intérieur du protecteur auditif. La quatrième colonne indique le niveau de masquage du bruit intérieur

prévu par la norme ISO. Les deux colonnes suivantes représentent les composantes des bandes d'un tiers d'octave (à l'extérieur et à l'intérieur du protecteur auditif, respectivement) du signal de marche arrière associé au rapport S/B de référence de 0 dBA, pour les SPL couvrant tout le spectre. Les deux dernières colonnes comparent les rapports-seuils S/M (signal/masque) au modèle de l'ISO et au modèle Patterson corrigé.

Puisque le niveau de masquage est une indication du seuil d'audibilité d'un signal masqué par le bruit, on pourrait s'attendre à ce que le rapport S/M soit positif pour au moins l'une des fréquences du signal. On remarque que la composante dominante du signal de marche arrière de Robinson se situe à 1 250 Hz. À cette fréquence, la donnée «masque ISO» indique que le taux de détection de 90 % obtenu pour le signal à un S/B de -16 dBA correspond à un rapport S/M de -8,4 dB, tandis que la donnée de notre masque corrigé de Patterson indique que le taux de détection de 90 % est associé à un rapport S/M de +0,5 dB. Bien qu'il n'apparaisse pas dans le tableau 2, le taux de détection de 65 % (obtenu à un rapport S/B de -24 dBA) est associé à un rapport S/M de -16,4 dB (ISO) et de -7,5 (Patterson corrigé). Nous concluons que notre modèle de masquage est un meilleur prédicteur du masquage vers les hautes fréquences que la méthode de l'ISO.

3.3 Évaluation de l'urgence apparente du signal

3.3.1 Données tirées de la documentation

Beaucoup des rapports de recherche sur les dispositifs d'avertissement sonore traitent des sirènes des véhicules d'urgence. Mais les enjeux et les résultats de ces recherches s'appliquent également aux klaxons des locomotives. Edworthy et coll. [1991] se sont penchés sur les effets des caractéristiques du signal sur son urgence apparente. Ils ont étudié l'influence de la fréquence fondamentale, de la série d'harmoniques, de l'enveloppe d'amplitude, des harmoniques décalés et des caractéristiques relatives au rythme et à la mélodie. Ils ont constaté que tous ces facteurs avaient, de fait, une influence sur la perception de l'urgence. Les fréquences fondamentales comprises entre 150 et 530 Hz ont été mises à l'essai avec leurs composantes harmoniques jusqu'à 4 kHz. À la comparaison des signaux, ceux dont la fréquence fondamentale était élevée étaient perçus comme plus urgents, même si l'ampleur de l'écart entre les fréquences n'était pas aussi important que le sens de cet écart (p. ex., l'urgence apparente d'un signal passant de 350 à 200 Hz était plus grande que celle d'un signal passant de 530 à 150 Hz). L'effet de l'enveloppe d'amplitude était clair : un signal à attaque et extinction rapides (20 ms) était perçu comme étant plus urgent qu'un signal à attaque et extinction plus lentes. Les signaux formés d'harmoniques réguliers (tous de même ordre) étaient interprétés comme étant moins urgents que les signaux aux amplitudes irrégulières. Les variations aléatoires de l'amplitude donnaient une impression accrue d'urgence comparativement aux irrégularités répondant à un modèle standard (p. ex., amplitude de tous les harmoniques pairs réduite de 10 %). En ce qui concerne la structure mélodique, les signaux formés de sons atonaux (sans structure mélodique apparente) étaient interprétés comme étant les plus urgents.

Concernant les résultats des travaux d'Edworthy et coll. sur l'urgence apparente associée à une attaque rapide, nous notons que lorsqu'un train s'approche, son volume sonore augmente (les pertes diminuant avec la distance), ce qui représente pour l'auditeur une forme d'attaque. Ainsi,

il devient important de s'assurer que le mécanisme d'activation du klaxon produise l'attaque la plus rapide possible. En plus d'avoir une incidence sur l'efficacité de l'avertissement, le temps d'attaque influe directement sur la distance d'avertissement. Par exemple, si le klaxon d'une locomotive ne parvient pas à atteindre le niveau sonore efficace dans les deux secondes, un train de voyageurs grande vitesse roulant à 160 km/h aura franchi près de 90 m (300 pi) avant que le niveau d'avertissement soit atteint. D'où les répercussions sur le type de robinet de commande utilisé. Selon un fabricant de klaxons de locomotives, un délai d'activation de deux secondes est typique des klaxons à activation manuelle dont le robinet de commande n'est pas installé près du klaxon. Par contre, lorsque le klaxon est équipé d'un système d'activation automatique installé à sa base, le signal est quasi instantané. Il est donc recommandé de placer le robinet de commande le plus près possible du klaxon lors de l'installation de klaxons sur des locomotives neuves ou d'installations en rattrapage.

Donnant suite aux travaux évoqués ci-dessus, Haas et Edworthy [1996] ont mené des expériences sur des signaux d'avertissement sonore, en variant la hauteur tonale, la vitesse et l'intensité. Ils ont conclu que les signaux considérés comme les plus urgents étaient composés d'impulsions et qu'ils affichaient une fréquence fondamentale relativement élevée (800 Hz), un SPL supérieur à 40 dBL et un court intervalle entre impulsions. Ils ont également conclu que plus la fréquence fondamentale est élevée et plus l'intervalle entre les impulsions est réduit, plus le signal est perçu comme urgent.

Autre facteur de l'urgence apparente : la fréquence fondamentale. Une fréquence fondamentale basse aura pour effet de produire un large spectre d'harmoniques dans une largeur de bande donnée (une fréquence fondamentale de 250 Hz peut produire 15 harmoniques jusqu'à 4 kHz, tandis qu'une fréquence fondamentale de 622 Hz n'en produit que 5). On pourrait penser que la probabilité de détecter un signal à fréquence fondamentale basse augmente en raison de ses harmoniques. Mais les résultats de l'étude d'Edworthy et coll. montrent qu'un signal dont la fréquence fondamentale est élevée (et qui, du même coup, compte moins d'harmoniques) a une plus grande efficacité d'avertissement. À noter que l'intensité globale de chaque signal sonore était maintenue constante dans l'étude d'Edworthy et coll. Ainsi, lorsque les fréquences fondamentales sont élevées et que le nombre d'harmoniques est par conséquent plus faible, il faut élever l'intensité par harmonique pour atteindre la même intensité globale. En outre, l'amplitude irrégulière des harmoniques fait en sorte que certains harmoniques sont plus intenses ou moins intenses que les harmoniques réguliers. Ces résultats peuvent être une indication que l'intensité maximale des harmoniques compris dans le spectre du signal constitue le facteur sous-jacent, plutôt que le nombre d'harmoniques présents.

Quoi qu'il en soit, ces résultats demeurent pertinents pour la conception des klaxons. Ainsi, ils indiquent que, pour un klaxon à niveau sonore fixe, il faudrait privilégier une fréquence fondamentale élevée assortie de peu d'harmoniques de forte intensité, plutôt qu'une fréquence fondamentale basse avec de nombreux harmoniques de faible intensité. Cependant, nos expériences de détection révèlent que les fréquences de plus de 2,5 kHz sont très sensibles à l'orientation de la tête de l'auditeur. Or, étant donné que le niveau sonore à l'intérieur d'un véhicule ne peut jamais être beaucoup supérieur au seuil de «détection», l'auditeur risque de ne pas détecter un signal formé de quelques harmoniques seulement. De plus, comme on le verra au paragraphe 3.3.3, il est plus facile de mettre au point un klaxon à fréquence fondamentale basse

capable de produire des harmoniques qu'un klaxon à fréquence fondamentale élevée. Ces facteurs, combinés aux inconvénients posés par le fait de s'éloigner trop du signal connu d'une locomotive, nous mènent à recommander des fréquences fondamentales basses pour les klaxons de locomotives.

3.3.2 Expériences portant sur les sons purs

Des expériences ont été réalisées avec des signaux de faible intensité afin de simuler la perception des sons à l'intérieur d'un véhicule. La méthode et les résultats sont présentés à la partie 2 de l'annexe D. L'urgence apparente des sons purs en l'absence de bruit de fond est illustrée à la figure 7. En l'absence de bruit de fond et à ces faibles intensités, l'augmentation du niveau sonore a peu d'effet sur l'urgence apparente du signal. Mais l'augmentation de la fréquence du signal accroît l'urgence apparente qui y est associée. Il a donc été conclu que même à faible intensité, le rapport entre l'urgence perçue et la fréquence, établi par d'autres études, se confirme.

Une autre expérience a été réalisée cette fois sur les sons purs en présence du bruit produit par le véhicule. Les résultats de cette expérience sont présentés à la figure 8. Au cours de cette expérience, l'intensité allait du seuil de détection (dérivé des résultats d'essais antérieurs) à +6 dB. Puisque tous les signaux ont été détectés alors que le rapport signal/bruit (S/B) était négatif, il s'ensuit qu'un seuil signal/masque (S/M) de zéro correspond à un rapport S/B négatif.

Étant donné que la caractéristique du bruit dans le véhicule diminue avec l'augmentation de la fréquence du signal, les points de données du rapport S/M de 0 dB sont à une intensité de signal plus faible à 4 000 Hz qu'à 500 Hz. Les nombres inscrits sur le graphe représentent les niveaux d'intensité associés à la courbe du rapport S/M de 0 dB à chaque fréquence. Ainsi, une courbe de S/M de 0 dB comprend un signal de 39 dB à 500 Hz et un signal de 21 dB à 4 000 Hz. En raison soit de la présence de bruit, soit du fait que la caractéristique du bruit comporte une baisse du niveau sonore avec l'augmentation de la fréquence, l'urgence apparente n'est pas aussi sensible à l'accroissement de la fréquence qu'elle l'était en l'absence de bruit. Néanmoins, on remarque qu'un signal de faible intensité, à 4 000 Hz, est perçu comme étant environ 50 % plus urgent qu'un signal plus intense d'une fréquence de 500 Hz (p. ex., 41 % des participants ont interprété un signal de 27 dB à 4 000 Hz comme étant urgent, contrairement à 27 %, dans le cas d'un signal de 45 dB à 500 Hz).

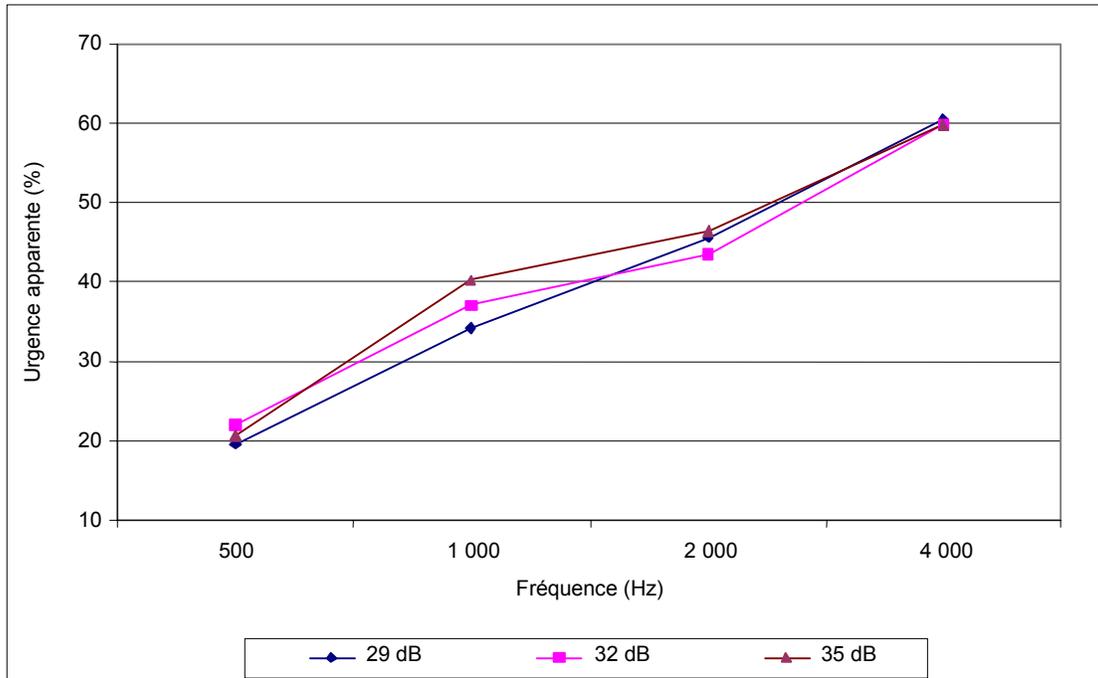


Figure 7 Urgence apparente des sons purs en l'absence de bruit

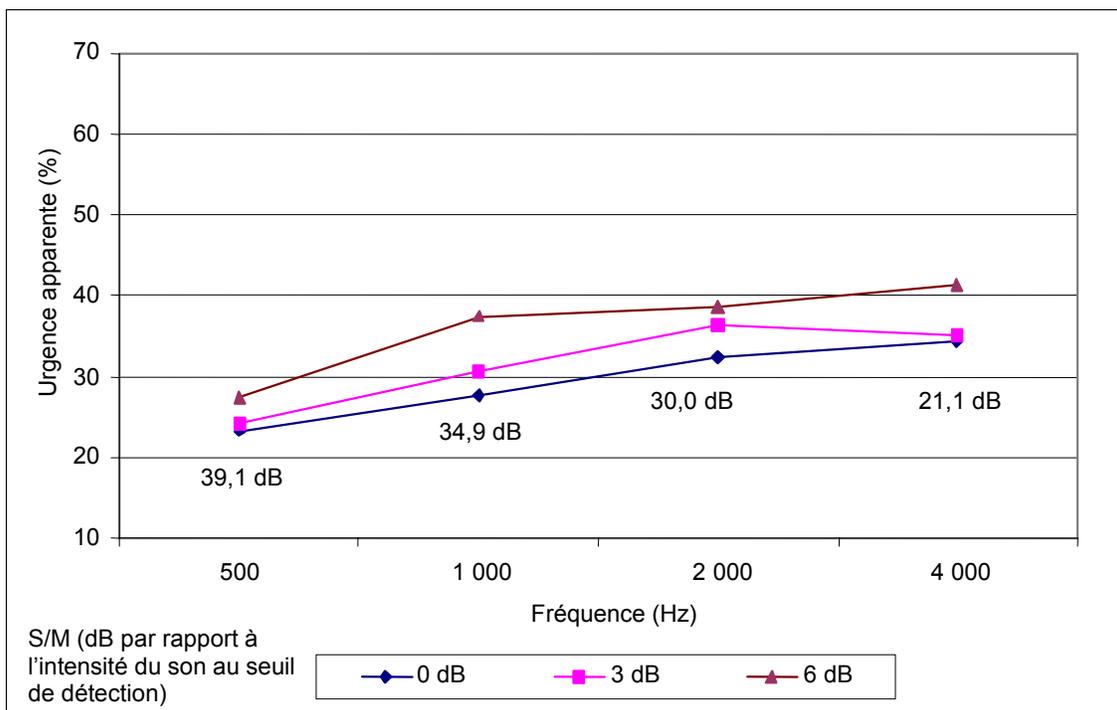


Figure 8 Urgence apparente de sons masqués

3.3.3 Expériences sur le son des klaxons

Des klaxons de locomotives ont été caractérisés avec la participation du fournisseur de klaxons Airchime Manufacturing Ltd. [1985]. Des mesures de niveau sonore ont été faites à une distance de 180 m, dans une gare de marchandises inoccupée, à Mission, en Colombie-Britannique. Les caractéristiques spectrales des klaxons (mesures prises dans des bandes d'un tiers d'octave) sont présentées au tableau 3. Il convient de noter que les fréquences fondamentales mentionnées sont les valeurs nominales inscrites sur les étiquettes des klaxons. Les fréquences mesurées ne concordaient pas toujours. L'écart était la plupart du temps inférieur à 12 Hz, mais quelques écarts étaient suffisamment grands pour fausser les résultats. Ainsi, la fréquence nominale de 415 Hz était en réalité de 431 Hz, la fréquence nominale de 494 Hz, de 512 Hz, et la fréquence nominale de 512 Hz, était plutôt de 550 Hz.

Tableau 3 Spectre des fréquences de cornets de klaxons (en dB, normalisées à 100 pi)

Bande d'un tiers d'octave (Hz)	Fréquence fondamentale nominale									
	261 Hz	311 Hz	370 Hz	415 Hz [#]	440 Hz	470 Hz	494 Hz [#]	512 Hz [#]	622 Hz	660 Hz
250	91	58	57	55	55	58	59	59	59	60
315	56	94	59	53	53	57	54	58	60	58
400	50	56	88	95	86	62	56	54	62	57
500	86	54	53	83	91	94	94	91	59	58
630	56	91	75	53	53	57	57	83	97	96
800	88	64	97	95	91	63	57	55	60	62
1 000	90	91	82	82	95	95	94	93	62	65
1 260	86	86	89	86	86	76	59	85	96	95
1 600	87	80	85	82	80	84	92	91	63	65
2 000	92	91	83	89	88	93	86	92	88	90
2 500	93	92	92	89	92	88	85	90	83	87
3 200	88	89	87	89	86	89	85	85	80	87
4 000	90	86	86	82	85	86	90	90	80	86
5 000	85	86	83	81	83	80	90	86	78	81

Les fréquences mesurées pour ces cornets affichaient un écart de plus de 12 Hz par rapport à la fréquence nominale (se reporter au texte).

Les valeurs présentées au tableau 3 ont été normalisées à 100 pi pour chaque cornet, et les bandes d'un tiers d'octave correspondant à des valeurs supérieures à 90 dB ont été mises en évidence. On remarque que les cornets à fréquence fondamentale basse (261 Hz et 311 Hz) produisent une plus grande énergie sonore au-delà de 1 600 Hz que les cornets à fréquence fondamentale haute (622 Hz et 660 Hz)⁶. L'énergie des cornets de 622 Hz et 660 Hz se situe principalement dans la fréquence fondamentale et l'harmonique n° 2, tandis que les cornets de 261 Hz et 311 Hz ont

⁶ Nous notons que les klaxons de construction récente et les effets de sol à la distance de mesure accentuent les bandes de fréquences élevées, comparativement aux mesures de klaxons de locomotives effectuées à 30,5 m de distance. Toutefois, le but principal de ces essais était de comparer les différents types de klaxons à des distances s'appliquant aux trains grande vitesse.

plus d'énergie dans les bandes de 4 000 et 5 000 Hz que les cornets de 622 Hz et 660 Hz. Il convient de noter que ce sont les cornets de 494 Hz et de 512 Hz qui affichent le contenu le plus riche dans les bandes de 4 000 Hz et de 5 000 Hz.

Des sept enregistrements de klaxons à cornet simple effectués au cours des essais de Mission, ont été tirés, par mixage électronique, 23 sons de klaxons différents. Les chercheurs ont ensuite analysé l'urgence apparente associée à chacun de ces signaux lors d'une expérience en laboratoire (se reporter à la partie 3 de l'annexe D pour de plus amples détails). Chaque son de klaxon était diffusé à 70 dB et les participants devaient évaluer l'urgence associée à chaque son. Ces sons étaient engendrés par des klaxons à 3, 4 et 5 cornets, à fréquences centrales variables. Pour l'ensemble des combinaisons sonores, la fréquence fondamentale la plus basse et la fréquence fondamentale la plus haute étaient constantes, à 311 Hz et 622 Hz, respectivement.

L'ajustement optimal des données, selon les attentes théoriques, indiquent un accroissement de l'urgence apparente d'un signal avec :

- l'accroissement de la valeur du centroïde (moyenne pondérée en amplitude du spectre de fréquences);
- l'accroissement de la dissonance musicale;
- l'augmentation du nombre de cornets.

La figure 9 résume les résultats de cette expérience. Le centroïde était le facteur le plus important, expliquant à lui seul 35 % de la variance. La dissonance et le nombre de cornets expliquaient chacun environ 14 % de la variance. Toutefois, la forte corrélation croisée entre la dissonance et le nombre de cornets du klaxon n'a pas permis d'isoler ces deux facteurs de façon statistiquement significative. Nous remarquons qu'une part importante de la variance pourrait s'expliquer par la présence (ou l'absence) du cornet de 494 Hz. Cependant, ce paramètre était fortement corrélé avec le centroïde et cette corrélation ne s'appuie sur aucune base théorique. C'est pourquoi ce facteur n'a pas été inclus dans l'équation prédictive.

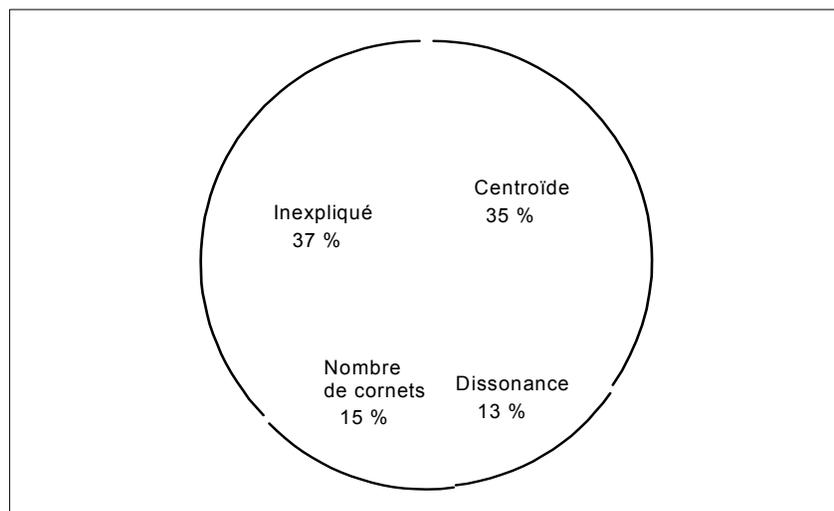


Figure 9 Facteurs contribuant à l'urgence apparente des signaux de klaxon

3.3.4 Discussion des résultats

On pourrait penser que l'accord harmonique des klaxons de locomotives d'aujourd'hui est davantage une affaire de nostalgie que de sécurité. Toutefois, il s'agit du son reconnu d'une locomotive en Amérique du Nord, et avant de remplacer ce son caractéristique par un autre, il faudrait procéder à des essais pour s'assurer que le nouveau son est toujours reconnu comme provenant d'un klaxon de locomotive. Les résultats de notre étude montrent que la gamme actuelle des cornets pour klaxons de locomotives est suffisante pour doter un dispositif d'avertissement sonore des caractéristiques souhaitées.

À toutes nos évaluations de l'efficacité des dispositifs d'avertissement sonore sur le plan de la sécurité, c'est le klaxon à 5 cornets qui a affiché le meilleur rendement. Cela ne signifie pas toutefois, qu'un klaxon à 5 cornets est obligatoire; une combinaison de trois cornets produisant un signal concentré dans la gamme des 2 000 et 4 000 Hz peut également être efficace. Nos mesures de nouveaux klaxons à 3 cornets dans une gare de marchandises a démontré que la largeur de spectre de ces derniers était semblable à celle des klaxons à 5 cornets. Cependant, les klaxons à 3 cornets, tels que caractérisés dans les publications scientifiques et par certaines de nos mesures de trains en service payant, ne couvraient pas aussi bien le spectre. Les résultats issus de nos travaux sur la détection de signaux à l'intérieur d'un véhicule indiquent qu'un signal à spectre large a une efficacité supérieure de 5 dB à celle d'un signal à spectre étroit de même amplitude. L'important volume d'air requis par le dispositif d'avertissement à 5 cornets rend le klaxon plus vulnérable aux variations de pression atmosphérique⁷. La puissance du signal d'avertissement des trains de marchandises, après une application prolongée des freins, et des voitures à cabine de commande, qui puisent l'air des klaxons dans le circuit de freinage, serait particulièrement affaiblie par l'ajout de cornets. Les avantages que procure un klaxon à 5 cornets, par rapport à un autre à 3 cornets, ne sont pas assez considérables pour que nous les recommandions comme norme pour toutes les locomotives. Cependant, nous croyons que les locomotives roulant à plus de 70 mi/h devraient être équipées d'un klaxon à 5 cornets, que l'équipe de train pourrait actionner en cas d'urgence. Nous insistons également sur l'importance, au moment de l'achat des klaxons, de choisir les bonnes combinaisons de fréquences et de préciser le contenu en harmoniques et de profiter de la remise à neuf des klaxons à 3 cornets pour élargir le spectre du signal d'avertissement.

Nos résultats révèlent que l'augmentation de la dissonance entraîne une certaine augmentation de l'urgence apparente du signal. Cet effet n'était pas aussi important que celui de la fréquence et son influence n'a pu être statistiquement isolée de celle attribuable à l'accroissement du nombre de cornets. Nous recommandons aux compagnies de chemins de fer qui optent pour un klaxon à deux niveaux sonores ou un klaxon réservé aux situations d'urgence, de choisir une combinaison de fréquences qui produit une certaine dissonance. Nous ne croyons pas que cette recommandation devrait devenir une exigence réglementaire et nous n'estimons pas la dissonance souhaitable pour un klaxon normal, actionné fréquemment pour donner les avertissements prescrits par le règlement.

⁷ Un des autres avantages du klaxon à cornet simple est que ce dernier est plus facile à focaliser/encastrier. Il serait beaucoup plus difficile d'aménager un renforcement pour un klaxon dont le diamètre d'ouverture des cinq cornets totalise 750 mm qu'un autre, à cornet simple, dont le diamètre d'ouverture est de 200 mm. Une des options possibles pour les nouvelles locomotives équipées d'un klaxon à deux niveaux sonores serait d'encastrier le klaxon normal à trois cornets dans le capot de la locomotive pour réduire le bruit dans la cabine et dans la collectivité et de monter les deux autres cornets (d'urgence) sur le toit.

4. INFLUENCE DE L'EMPLACEMENT DU KLAXON ET DE LA VITESSE DU TRAIN

4.1 Retour sur la recherche documentaire

4.1.1 Influence de l'emplacement du klaxon, établie à l'aide d'essais statiques

Pour évaluer l'efficacité de l'avertissement donné par différents types de klaxons placés à différents endroits, il faut avoir une bonne représentation de son spectre de fréquences. Il existe, dans la documentation scientifique, des données pour des bandes d'un tiers d'octave, et on peut aussi en obtenir auprès de compagnies de chemin de fer. Pour déterminer les caractéristiques de klaxons représentatifs, nous avons consulté trois sources : les travaux réalisés pour le compte de la FRA par le Volpe Center [Keller et Rickley, 1993], les mesures faites par VIA Rail, et celles effectuées par Seshagiri et Stewart [1991, 1992]. Nous avons comparé ces données avec les résultats de nos propres essais de klaxons récents, non montés sur des locomotives, réalisés dans une gare de marchandises.

Les données de VIA Rail concordent assez bien avec celles de Keller et Rickley pour ce qui est de l'amplitude du son émis par un klaxon à 3 cornets en milieu de locomotive, tandis que celles concernant la forme du spectre étaient en accord avec nos mesures (prises aux vitesses d'exploitation), dans le cas des deux klaxons à 3 et à 5 cornets situés directement derrière la cheminée d'échappement. Mais nos résultats s'écartaient des données tirées des rapports cités, pour ce qui est de la forme du spectre et de l'amplitude du son émis par le klaxon à 3 cornets monté à l'avant. En effet, nos mesures, autant celles faites en gare de marchandises qu'en service payant, révèlent que la transition d'un klaxon à 5 cornets à un klaxon à 3 cornets est moins pénalisante (pour l'ampleur du spectre et l'intensité sonore) que le donnent à penser les résultats de Keller et Rickley. C'est pourquoi nous avons adopté les données de Keller et Rickley en tant que données représentatives d'un klaxon à 5 cornets monté à l'avant et d'un klaxon monté au milieu de la locomotive, derrière l'échappement, tandis que nous utilisons nos propres mesures comme étant caractéristiques d'un klaxon à 3 cornets monté à l'avant.

Les spectres des klaxons représentatifs (émis vers l'avant de la locomotive) utilisés dans ce rapport sont illustrés à la figure 10. Dans la légende, «3C-110dB» signifie un klaxon à 3 cornets monté à l'avant qui produit 110 dB à 30,5 m (100 pi). De même, «5C-112dB» renvoie à un klaxon à 5 cornets monté à l'avant qui produit 112 dB à 30,5 m (100 pi). Et «ML-101dB» représente un klaxon à 5 ou à 3 cornets monté au milieu de la locomotive. Notre étude porte sur la forme spectrale du SPL produit par des klaxons à 5 cornets et à 3 cornets lorsqu'ils sont montés à l'avant et au milieu de la locomotive. Nos travaux révèlent que la forme spectrale des signaux émis par un klaxon à 5 cornets monté à l'avant est relativement uniforme, mais que l'amplitude de ceux-ci varie.

Selon les données du fabricant du klaxon, un klaxon à un seul cornet (de même qu'à 2, à 3 et à 4 cornets) peut atteindre la même intensité acoustique qu'un klaxon à 5 cornets, à condition de recevoir un débit d'air suffisant. Nos essais en service payant ont révélé une intensité acoustique de l'ordre de 108 à 115 dB pour les deux klaxons à 3 et à 5 cornets, lorsque celle-ci était mesurée

dans l'angle assurant une portée acoustique optimale. Aux fins de la présente étude, les données d'amplitude ne sont pas aussi pertinentes que la forme spectrale.

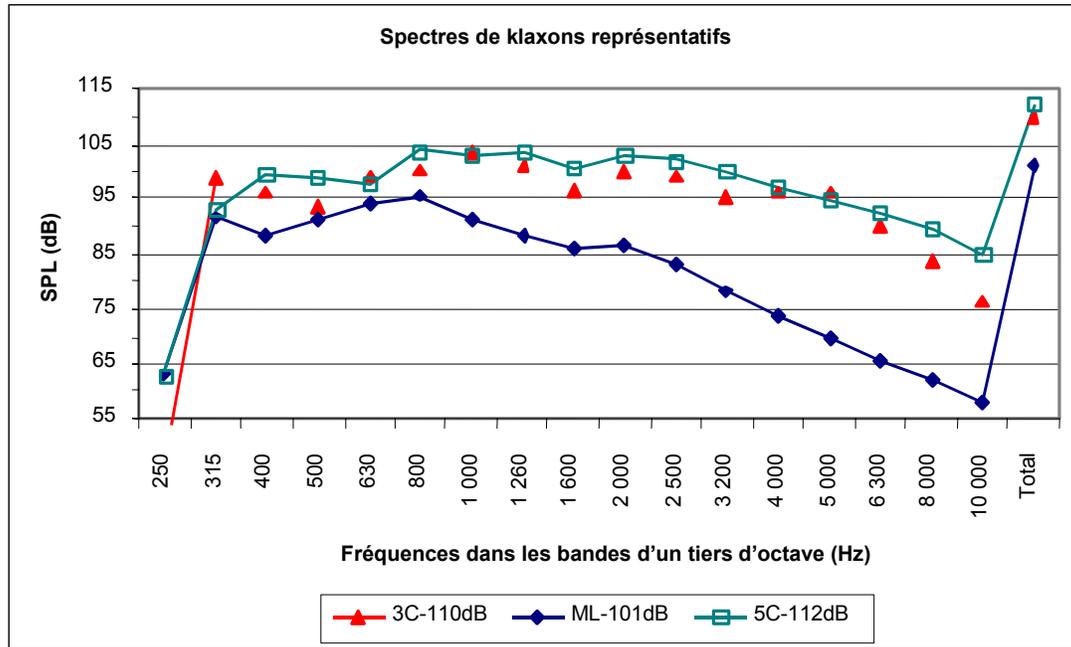


Figure 10 Caractéristiques spectrales des klaxons représentatifs

4.1.2 Influence de la vitesse du train, selon les données d'autres chercheurs

Une étude menée pour le compte de Travail Canada [Seshagiri et Stewart, 1991] établissait que les SPL d'une locomotive se déplaçant 40 mi/h (67 km/h) sont toujours plus faibles que les SPL (mesurés à la même distance) d'une locomotive immobile. La figure 11 illustre les courbes ajustées découlant de multiples mesures faites à plusieurs distances.

À 800 m de distance, le niveau de pression acoustique était de 3 dB de moins lorsque la locomotive roulait à 40 mi/h que lorsqu'elle était à l'arrêt. C'est à cette distance que le klaxon était actionné. L'atténuation du niveau sonore passait à 12 dB à 50 m, distance à laquelle le sifflement cessait. Les auteurs n'ont pas soulevé la possibilité d'une influence de la vitesse. Mais leurs résultats nous ont amenés à revoir d'autres données publiées, afin de vérifier le bien-fondé de notre hypothèse, à savoir que la puissance du son émis par le klaxon se dégrade à mesure qu'augmente la vitesse de la locomotive.

Aurelius et Korobow [1971] ont mesuré les SPL émis par des Metroliner à l'arrêt et par les mêmes locomotives circulant à environ 110 mi/h. Les courbes ajustées de leurs mesures sont présentées à la figure 12. Les distances ne se recoupent pas d'une étude à l'autre, mais si on extrapole le principe selon lequel le doublement de la distance entraîne une diminution de 6 dB du niveau sonore, on peut conclure que le niveau sonore est inférieur de 4,5 dB, en moyenne, lorsque le train est en mouvement.

Le klaxon de l'étude de Travail Canada était placé au milieu de la locomotive, mais décalé sur un côté (du côté opposé à celui d'où les mesures étaient prises). Dans l'étude d'Aurelius et Korobow, le klaxon était placé sur le toit, à environ un mètre du bord avant.

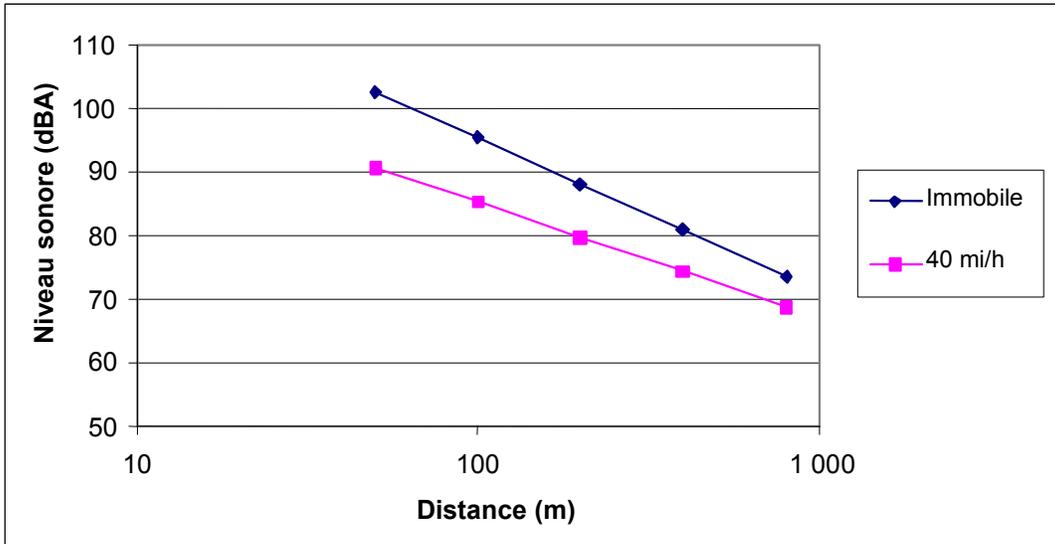


Figure 11 Mesures de Travail Canada sur un klaxon en mouvement et un klaxon à l'arrêt

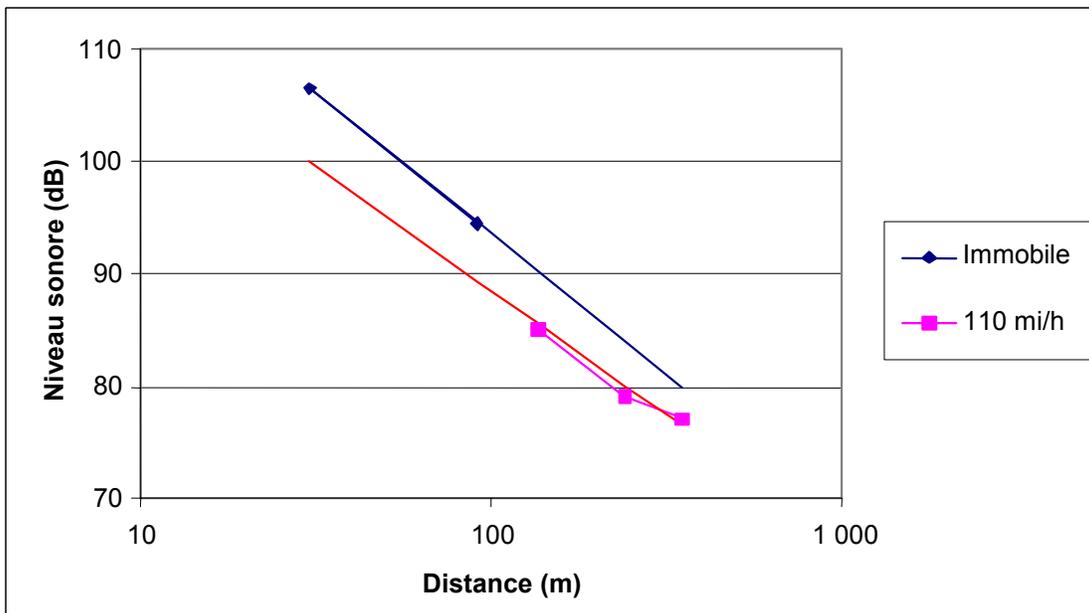


Figure 12 Essais d'Aurelius sur des klaxons de Metroliner en mouvement et à l'arrêt

Nous avons examiné les données d'essai colligées par VIA Rail lors de passages répétés d'une locomotive d'essai circulant à différentes vitesses, dont le klaxon était placé à différents endroits.

Les données spectrales n'ont été recueillies que par vent calme, pour deux passages de la locomotive (à 62 mi/h et à 86 mi/h). Dans les deux cas, le klaxon était monté à droite de son emplacement normal sur la locomotive, de sorte qu'il était à l'abri de tout effet engendré par le tuyau d'échappement. Nous avons extrait les données relatives à chaque passage d'une distance aussi près que possible de 200 pi (61 m) que le permettait l'intervalle d'échantillonnage de ½ seconde. L'intensité acoustique maximale était de 106,2 dBA (à 62 mi/h et à 199 pi) et de 103,2 dBA (à 86 mi/h et à 215 pi). La différence de distance pourrait expliquer quelque 0,67 dB des 3 dB d'écart.

Les spectres de fréquence correspondant aux deux vitesses sont illustrés à la figure 13. Le décalage vers la droite de la courbe établie pour la vitesse supérieure est attribuable à l'effet Doppler, qui explique aussi, dans les deux cas, des fréquences fondamentales et des harmoniques supérieurs à ceux qui auraient été obtenus avec une locomotive immobile. On peut constater que la fondamentale la plus faible (311 Hz) et ses harmoniques produisent une pression acoustique relativement faible, tandis que les deux fondamentales des cornets courts/fréquences hautes sont assez semblables. Or, le cornet long, qui est flanqué des deux cornets courts, produit la fondamentale la plus basse. Il est possible que le long cornet soit plus susceptible à l'accumulation de contre-pression lorsqu'il fend l'air à 28 m/s et à 39 m/s, et qu'au surplus, il protège les deux autres cornets du flux d'air.

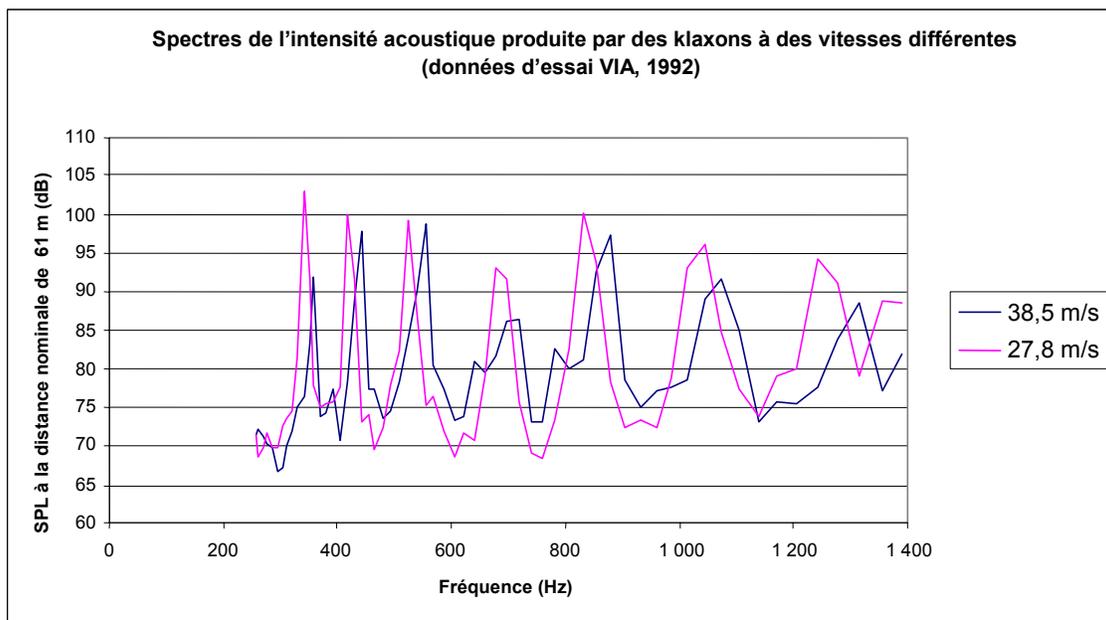


Figure 13 Essais de VIA Rail : spectres des sons émis par les klaxons, à deux vitesses

On peut penser à une interaction entre l'emplacement du klaxon et la vitesse du train, qui agit à son tour sur l'intensité acoustique produite par le klaxon. Au milieu des années 1980, les chemins de fer canadiens ont déplacé le klaxon de l'avant de la locomotive vers le milieu de celle-ci, pour réduire le niveau sonore dans la cabine de conduite. Sur les locomotives de trains

de voyageurs, le klaxon a été placé derrière la cheminée d'échappement. VIA Rail a alors remarqué que le klaxon n'émettait pas un son aussi clair à haute vitesse et a émis l'hypothèse que le courant chaud et ascendant des gaz d'échappement dissipait le son. La société ferroviaire a mené une série d'essais au début des années 1990 afin d'évaluer le rendement de ses klaxons. Il s'agissait d'essais statiques de moteurs fonctionnant à plein régime, qui visaient à reproduire des conditions d'échappement maximal. Ils ont révélé que l'intensité acoustique à 30,5 m à l'avant de la locomotive était la même, à plein régime et au ralenti. L'hypothèse selon laquelle la dissipation du son provenait du courant d'air chaud ascendant se trouvait donc réfutée. Comme le niveau sonore du klaxon dépassait les limites réglementaires de la FRA dans les conditions d'essai, et comme les gaz d'échappement ne semblaient pas influencer sur l'intensité acoustique produite, VIA Rail a maintenu le statu quo.

4.2 Sites et protocoles d'essai

Un des principaux objectifs de la présente étude était de caractériser l'intensité du son émis par divers types de klaxons placés à divers endroits sur la locomotive, et de déterminer l'influence de la vitesse du train sur cette intensité acoustique. Pour atteindre ces deux objectifs en perturbant le moins possible les opérations, nous avons effectué des mesures du niveau sonore au passage de trains en service payant. L'avantage de tels essais est qu'ils se font dans des conditions réelles, soit exactement les conditions dans lesquelles sera mise en œuvre l'application prévue. Ainsi, notre objectif principal, en optant pour des essais en service payant, était d'étudier l'influence de la vitesse du train sur l'intensité du son produit (en plus de minimiser les coûts et les dérangements). Nous avons donc comparé l'efficacité d'avertissement de l'approche d'un train associée à un large éventail de types et d'emplacements de klaxons, et de vitesses de trains. Ces comparaisons découlent de mesures directes sur le terrain, dont un grand nombre ont été prises à quelques minutes d'intervalle, dans des conditions environnementales identiques.

L'étude des signaux «tels que perçus» donne la représentation la plus réaliste et la plus précise possible de l'efficacité d'avertissement d'un klaxon de locomotive, car elle porte sur les signaux qui sont véritablement entendus au passage à niveau. Ces travaux ne pourraient toutefois pas servir de fondement à l'élaboration d'une norme. La plupart des caractérisations de klaxons de locomotives utilisent la norme recommandée par l'industrie, élaborée à partir de mesures prises à 30,5 m (100 pi) en avant d'une locomotive immobile. Nous avons analysé les signaux de façon à évaluer les caractéristiques du signal source telles qu'elles seraient mesurées à la distance de référence standard de 30,5 m.

La suite du présent chapitre est divisée en trois sections. La première donne un aperçu des sites d'essai et des mesures effectuées. La deuxième présente la comparaison des signaux «tels que perçus», et la troisième présente les caractéristiques dérivées du signal source.

Plusieurs passages à niveau ont servi à la mesure de l'intensité acoustique émise par les klaxons de locomotives en service payant. Un des meilleurs sites pour ce qui est de la variété des paramètres «emplacement du klaxon» et «vitesse du train» est le passage à niveau South Blair, à Whitby, en Ontario. Il s'agit d'une zone dégagée, où la végétation se limite à de l'herbe et quelques arbres de faible hauteur, du côté nord des voies. La figure 14 présente des photos prises de chaque côté des voies et la figure 15, un schéma de la géométrie du passage à niveau.

Voici un résumé de l'activité ferroviaire au passage à niveau South Blair :

- Trains de banlieue de GO Transit roulant à 55 km/h, équipés de klaxons à 5 cornets montés au milieu de la locomotive, derrière l'échappement (locomotives F59PH de la fin des années 1980).
- Trains de banlieue de GO Transit roulant à 100 km/h, équipés de klaxons à 5 cornets montés à l'avant de la voiture à cabine de commande, au-dessus de la cabine de commande.
- Trains de voyageurs de VIA Rail roulant à 145 km/h, équipés de klaxons à 3 cornets montés au milieu de la locomotive, derrière l'échappement (locomotives F40 du milieu des années 1980).
- Trains de voyageurs de VIA Rail roulant à 145 km/h, équipés de klaxons à 3 cornets montés au-dessus de la cabine de conduite de la locomotive (locomotives LRC [légère, rapide et confortable] de la fin des années 1970).
- Divers types de locomotives de marchandises.

Comme il s'agit d'un lieu découvert, il est possible d'évaluer l'influence de la vitesse sur le son produit par le klaxon à divers angles par rapport à l'avant du train. En effet, la géométrie des voies à l'approche du passage à niveau est telle que le premier sifflement se produit à des angles faibles (environ 15 à 20 degrés), tandis que le dernier sifflement se produit à 65 degrés, dans le cas des trains allant vers l'ouest, et à 150 degrés, dans le cas des trains allant vers l'est.

Les mesures ont été prises au moyen de divers sonomètres Bruel et Kjaer (B&K) de type 1 (B&K 2239, B&K 2231 ou B&K 2209). Les vérifications d'étalonnage étaient faites à l'aide de dispositifs B&K 4230 ou Quest 12-M (94 dB, 1 kHz). Pour les mesures à l'extérieur, des bonnettes pare-vent B&K UA-0237 étaient placées sur les microphones. Les signaux étaient enregistrés à l'aide d'un magnétophone à bobine FM B&K 7006 ou d'un magnétophone à cassette FM TEAC R61D. La numérisation et les analyses spectrales ont été réalisées sur des fréquences échantillons allant de 12 à 48 kHz, à l'aide d'un analyseur de signaux numériques 16 bits (modèle Siglab 20-42, Keithley-DAS-1600 ou CS-4297A). La vitesse du train était mesurée à l'aide d'un pistolet radar Kustom HRS, et le vent, la température et le taux d'humidité, à l'aide d'une station de saisie de données environnementales Krestel 3000.



Train allant vers l'ouest, mené par une voiture à cabine de commande



Accotement de l'approche routière nord-sud



Train allant vers l'est, mené par une locomotive

Figure 14 Photographies du passage à niveau South Blair

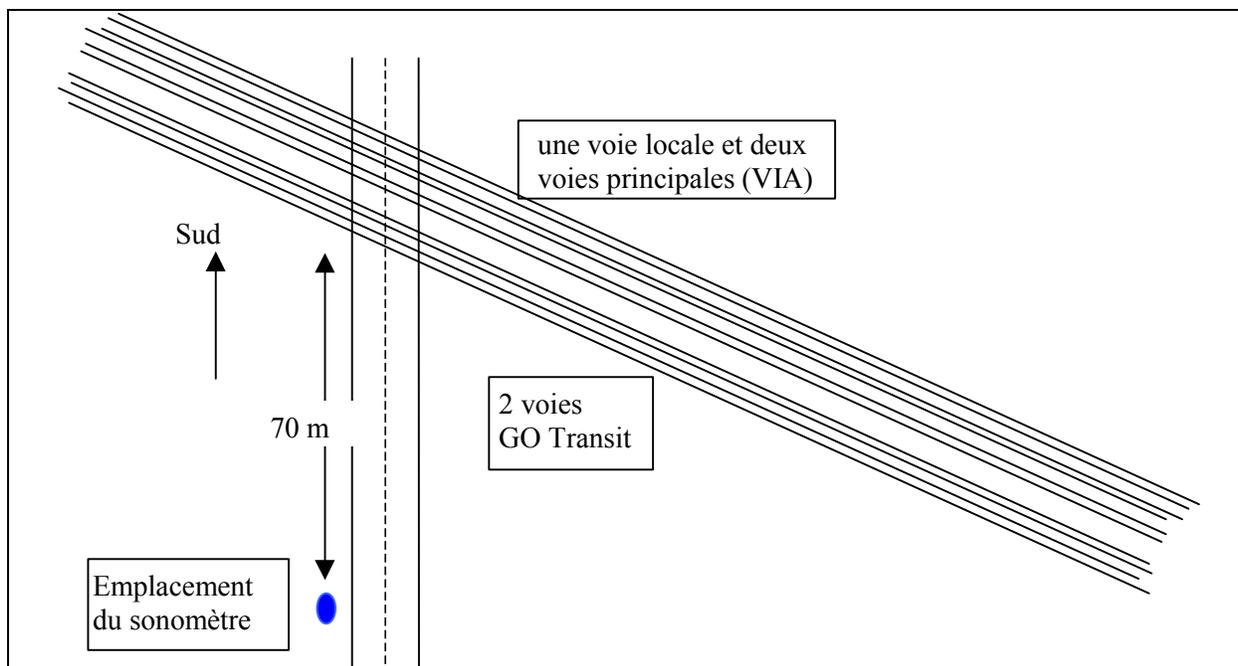


Figure 15 Schéma de la géométrie du passage à niveau South Blair

4.3 Comparaison des signaux «tels que perçus»

4.3.1 Comparaison des niveaux d'énergie acoustique totale

On trouvera ci-après une comparaison du SPL du spectre continu, tel qu'enregistré au site de mesure, pour plusieurs emplacements de klaxon et vitesses de train. Ne sont reproduites ici que quelques mesures représentatives. On se reportera à l'annexe E pour un ensemble plus complet de mesures. La figure 16 illustre la séquence sonore (deux long coups, un coup bref et un coup long) produite par les klaxons à 5 cornets montés à deux endroits différents sur un train GO Transit s'approchant du passage à niveau South Blair.

Sur l'ordonnée est représenté le niveau acoustique mesuré à 70 m au nord du passage à niveau, et sur l'abscisse, la distance entre l'avant du train et le sonomètre au moment de la mesure. Le SPL était enregistré toutes les demi-secondes. La courbe du haut, en noir, est une courbe de référence, qui montre la diminution théorique de 6 dB par doublement de la distance, mesurée par rapport à 110 dB à 30,5 m (100 pi). La courbe pointillée représente le niveau acoustique émis par un klaxon monté à l'avant d'un train roulant vers l'ouest à une vitesse de 90 km/h (56 mi/h). La séquence sonore a débuté en retard (soit à l'intérieur du ¼ mi ou des 400 m séparant le passage à niveau du poteau commandant de siffler). Comme on le voit, le niveau acoustique produit par le klaxon se rapproche de la courbe de référence, sur tout son tracé (le niveau acoustique est d'abord mesuré à un angle de 20 degrés du klaxon, angle qui atteint 60 degrés à la fin).

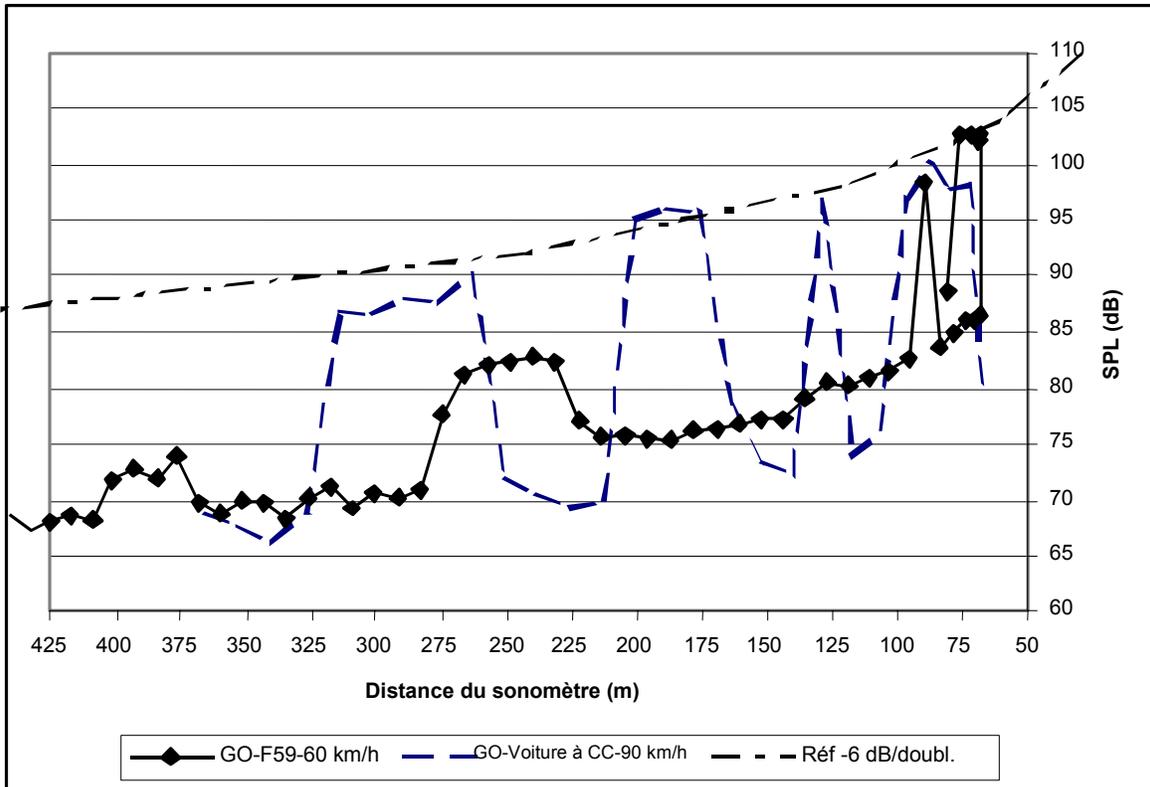


Figure 16 Comparaison du niveau de pression acoustique produit par un klaxon à 5 cornets

La courbe continue, en noir, correspond à la mesure du SPL émis par le klaxon monté au milieu d'une locomotive F59, derrière l'échappement, qui tire un train roulant vers l'est à 60 km/h (36 mi/h). En raison de la géométrie du passage à niveau, les trains qui se dirigent vers l'est passent par un point perpendiculaire au sonomètre avant d'atteindre le passage à niveau. Le dernier coup de klaxon du train qui va vers l'est se produit à proximité de ce point perpendiculaire (c.-à-d. du point le plus près du sonomètre). D'où la prise de plusieurs mesures sur des distances quasi identiques par rapport au sonomètre. Le train s'éloigne alors du sonomètre en continuant à siffler. Le niveau acoustique du klaxon est considérablement inférieur aux 110 dB de la courbe de référence aux angles faibles du début du sifflement (environ 15 degrés) et atteint la courbe de référence avant et après le point perpendiculaire. Ainsi, contrairement à la courbe pointillée, la courbe continue revient sur elle-même.

La figure 17 présente le SPL mesuré de deux klaxons montés sur des locomotives de VIA Rail qui s'approchent du passage à niveau South Blair à environ 145 km/h (90 mi/h). La courbe pointillée correspond au niveau acoustique produit par le klaxon de la locomotive d'un train LRC (léger, rapide, confortable) roulant à 147 km/h. Le klaxon produit un niveau acoustique qui est très près des niveaux représentés par la courbe de référence sur tout son tracé (le niveau acoustique est d'abord mesuré à un angle de 15 degrés par rapport au klaxon, angle qui atteint 150 degrés à la fin). La courbe continue correspond au SPL d'une locomotive F40 équipée d'un klaxon placé en milieu de locomotive, derrière l'échappement. Dans le cas de cette locomotive, la séquence sonore était terminée bien avant que le train arrive au passage à niveau. Ainsi, le dernier coup de klaxon s'est fait entendre à proximité du point perpendiculaire (la plus faible

distance par rapport au sonomètre) et il n'a pas continué, comme dans le cas du train LRC. On voit que le niveau acoustique est de beaucoup inférieur aux 110 dB de la courbe de référence (et se confond avec le niveau du bruit du fond) aux angles faibles du début (environ 15 degrés), commence à monter à la distance de 125 m, et l'atteint au moment où il atteint le point perpendiculaire.

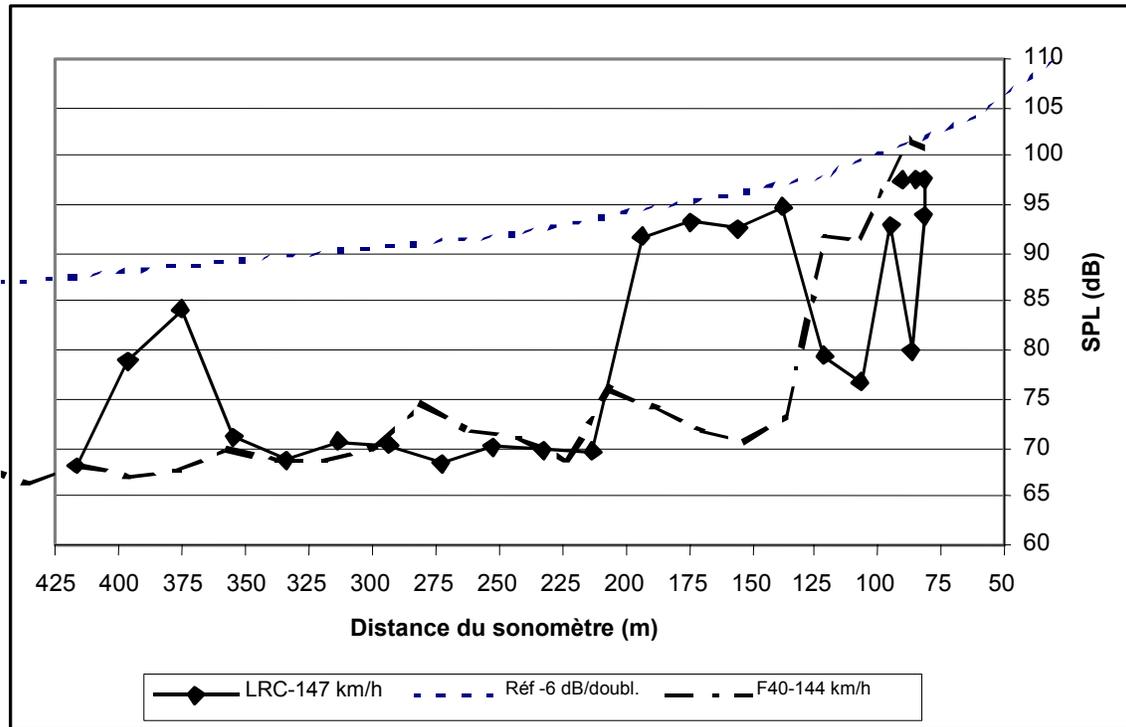


Figure 17 Comparaison des niveaux de pression acoustique produits par des klaxons à 3 cornets au passage à niveau South Blair

4.3.2 Illustration spectrographique à un faible rapport S/B

Il faut noter que le fait que le SPL du klaxon se confond avec le niveau du bruit de fond ne veut pas dire qu'un piéton ne l'entendrait pas. L'inconvénient d'une comparaison de l'énergie totale est que la composante fréquence n'est pas prise en compte. Si la fréquence du son émis par le klaxon est différente de celle du bruit de fond, celui-ci peut demeurer audible, contrairement à ce que peut laisser croire la courbe établie par la comparaison de l'énergie sonore totale. Cette lacune est illustrée à la figure 18, dont la partie supérieure comprend la courbe du SPL et la partie inférieure, le spectrogramme correspondant, pour une locomotive de marchandises SD70 s'approchant du passage à niveau South Blair à une vitesse de 40 mi/h. La courbe du SPL est trompeuse car on pourrait s'attendre que le son enregistré à la première seconde et à la septième seconde soit le signal du klaxon. De fait, ces sons proviennent de camions : l'énergie acoustique totale émise par le klaxon est inférieure à celle du véhicule routier. La différence entre le bruit produit par le véhicule routier et le signal du klaxon est clairement illustrée dans le spectrogramme, sous la courbe des SPL.

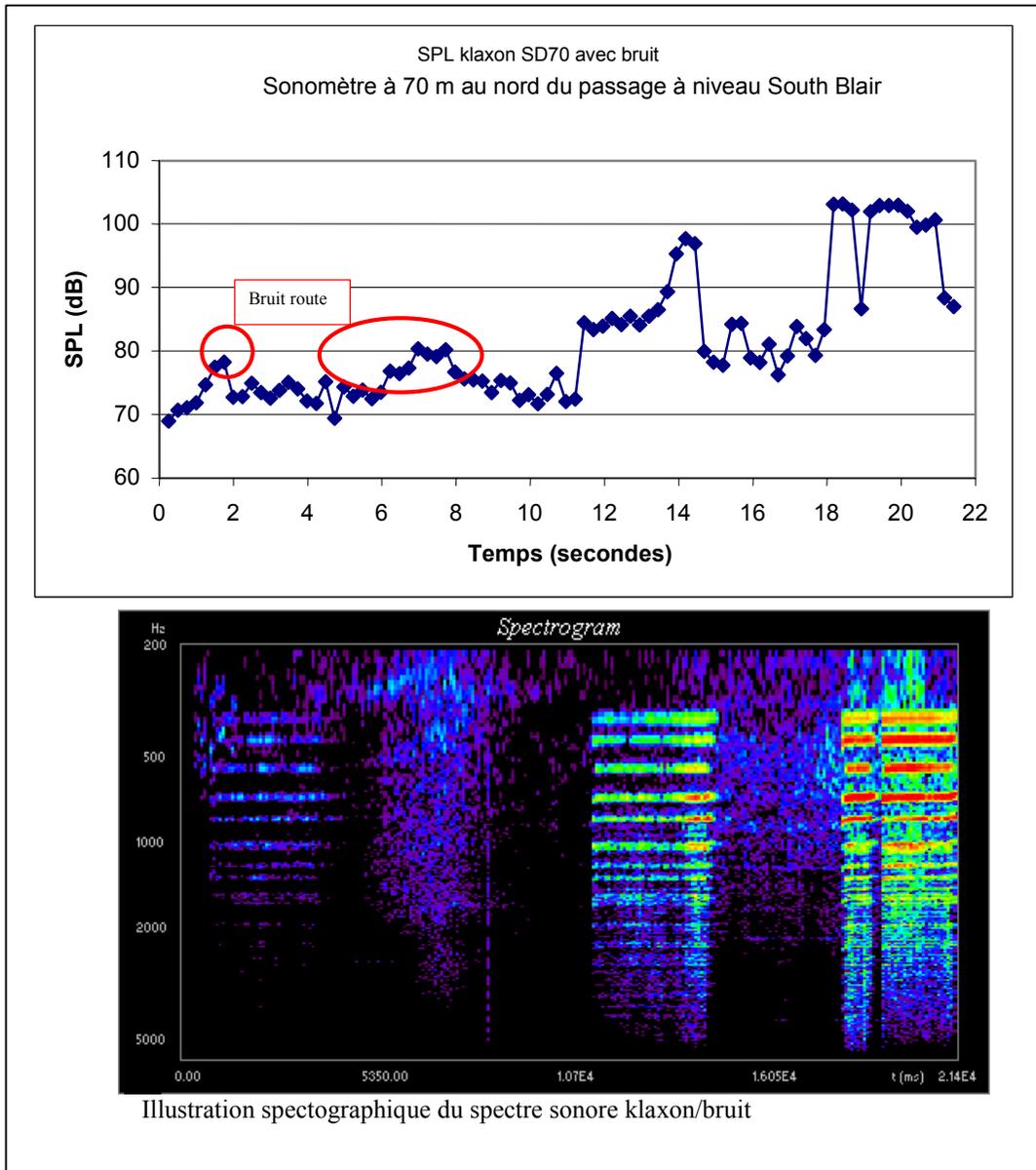


Figure 18 Comparaison du niveau de pression acoustique signal/bruit et spectrogramme correspondant

Le spectrogramme illustre le contenu spectral du signal du klaxon pour le même type d'approche, mesuré au même endroit. L'ordonnée représente la gamme des fréquences du signal, laquelle s'étend de 200 Hz au sommet à 5 000 Hz à l'origine, en intervalles de 11 Hz. L'abscisse correspond à l'échelle de temps, ajustée pour couvrir la séquence du signal pendant que le train s'approche du passage à niveau. La mesure d'une tranche spectrale est prise toutes les 85 ms. La troisième dimension du spectrogramme est le niveau acoustique du signal reçu, indiqué par une variation de la couleur. Le violet représente le début de l'échelle, ou 47 dB. Viennent ensuite, avec la hausse du niveau sonore, le bleu, le vert, le jaune, l'orange et le rouge, qui correspond à 95 dB. Pour une discussion plus détaillée du spectrogramme, se reporter au paragraphe 5.1.2.

L'élimination des sons d'intensité inférieure à 47 dB, combinée à l'absence de contenu sous 200 Hz, a pour effet d'éliminer du tableau beaucoup du bruit de fond généré par le train.

On peut voir que le bruit de fond contribue au SPL global, de la 18^e à la 21^e seconde. Par ailleurs, autant le graphique que le spectrogramme mettent en évidence la hausse du niveau de pression acoustique autour de la 14^e seconde. La chute abrupte de 13 dB affichée par la courbe est une bonne indication de l'effet d'écran produit par le profil du toit en avant du klaxon. Cet effet d'écran est on ne peut mieux illustré par les courbes polaires du niveau acoustique produit par le klaxon, dérivées ci-dessous en 4.4.

Le spectrogramme distingue clairement la hauteur tonale du signal du klaxon du bruit aléatoire produit par le passage du véhicule. On peut donc penser qu'un observateur pourrait distinguer le klaxon du bruit de fond, même si le SPL cumulatif du klaxon est plus faible que celui du véhicule. Nous notons toutefois que, même si le spectrogramme illustre bien l'efficacité relative du signal d'avertissement, il se révèle peu utile à des fins de comparaison quantitative. C'est pourquoi, à la section 4.4, nous utilisons des spectres de bandes d'un tiers d'octave pour isoler le klaxon et prédire le SPL du signal source. Nous reviendrons plus en détail sur les spectrogrammes au chapitre 5, qui traite des caractéristiques d'urgence de l'avertissement sonore.

4.4 Signaux sources - Courbes polaires dérivées

Les données de mesures présentées ci-dessus ont été soumises à des analyses supplémentaires qui visaient à évaluer la performance du klaxon à la distance équivalente réglementaire. C'est que l'utilisation de trains en service payant fait intervenir un certain nombre de facteurs parasites, qui accentuent l'incertitude des caractéristiques des signaux sources dérivées des données recueillies. Même si, pour minimiser l'incertitude, les principaux facteurs ont été mesurés et intégrés aux activités d'analyses et de réduction des données, les résultats comporteront toujours une marge d'incertitude plus grande que si les essais avaient été réalisés dans des conditions contrôlées, avec des klaxons immobiles. Le tableau 4 résume les facteurs d'incertitude et les mesures prises pour compenser ces facteurs.

Comme l'indique le tableau 4, nous avons utilisé des bandes d'un tiers d'octave pour isoler le spectre généré par le klaxon de celui du bruit de fond généré par le train, lequel se situait surtout dans des fréquences inférieures à 300 Hz. De façon générale, nous avons essayé d'éviter des situations comme le passage de camions, qui occasionnaient un bruit de fond correspondant à une valeur élevée dans le spectre du klaxon (comme l'illustre la figure 18). Nous avons éliminé la plupart des mesures fortement associées à un bruit spectral coïncident. Toutefois, il s'est présenté quelques situations où soit on ne disposait d'aucune autre mesure pour une combinaison locomotive-vitesse donnée, soit le signal émis par le klaxon était toujours très faible. Dans ces cas, lorsque le rapport S/B pour les bandes d'un tiers d'octave était inférieur à 5 dB, on obtenait le niveau sonore du signal du klaxon en soustrayant la puissance mesurée du bruit de fond, comme suit :

$$S = 10 \times \text{LOG} \left[10^{(M/10)} - 10^{(B/10)} \right]$$

où

S = SPL du signal émis par le klaxon (dB)

M = SPL mesuré (dB)

B = bruit de fond moyen mesuré en l'absence d'un signal de klaxon (dB)

Tableau 4 Méthode de dérivation des signaux sources

Facteur d'incertitude	Mesures prises pour y remédier
Vitesse variable du train	Vitesse du train mesurée par radar, performance en accélération prise en compte dans les calculs de l'emplacement, s'il y a lieu.
Sifflements variables d'un train à l'autre	Prise en note de la position du train (par rapport à la sortie du passage à niveau) au moment où le klaxon se tait; cette valeur, combinée aux valeurs de vitesse, permet d'établir la distance en fonction du temps.
Géométrie du passage à niveau	À la plupart des passages à niveau choisis, les approches ferroviaires étaient rectilignes; à deux sites, la voie ferrée présentait une courbure d'un degré, ce qui a été pris en compte dans les calculs de la distance et de l'angle.
Faibles rapports S/B	Le bruit de fond était toujours le plus élevé aux fréquences plus basses que celles du spectre du klaxon. Des données relatives à des tiers d'octave ont été utilisées pour isoler le klaxon, et les données ont été compensées pour les niveaux de bruit de fond, au besoin.
Absorption dépendante de la fréquence	Les effets de l'absorption atmosphérique ont été pris en compte lors des calculs faits conformément à la norme ANSI-1.26-1978. La gamme des conditions environnementales présente pendant les essais a mené à des fluctuations inférieures à 1 dB dans le spectre de puissance; ce facteur avait toutefois une influence déterminante dans la gamme de 3 à 5 kHz.
Effets de sol dépendants de la fréquence	Les effets de sol peuvent être très complexes. Comme le principal intérêt est le signal perçu plutôt que la dérivation du signal source, les effets de sol n'ont été pris en compte ni dans la dérivation des caractéristiques de la source, ni dans l'atténuation, dans les applications subséquentes aux comparaisons de besoins et de l'efficacité d'avertissement.

Le niveau sonore du klaxon, mesuré pour des bandes d'un tiers d'octave, a alors été converti en niveau sonore de référence à la distance standard de 30,5 m (100 pi), après correction pour la dissipation du signal à 20 fois le logarithme du rapport de distance (ou diminution de 6 dB par doublement de la distance) et application des calculs de la norme ANSI 1.26-1978 pour tenir compte de l'absorption atmosphérique. Les calculs de l'absorption atmosphérique sont très sensibles à la température et au taux d'humidité et ils influent considérablement sur la gamme de fréquences hautes du spectre du klaxon. Toutefois, comme le niveau sonore émis par le klaxon se situe principalement dans la gamme des fréquences de 600 à 1 200 Hz, l'influence sur le SPL cumulatif du klaxon était généralement inférieure à 2 dB.

Chaque point de donnée ainsi dérivé correspond à un moment précis de la séquence d'approche. La distance entre le klaxon et le sonomètre, et l'angle du signal émis par le klaxon par rapport à la direction de son déplacement ont été calculés d'après la géométrie du passage à niveau et la vitesse mesurée du train. Le résultat final est une estimation de la courbe polaire de puissance acoustique du klaxon à une distance de référence de 30,48 m (100 pi).

4.4.1 Influence de l'emplacement longitudinal

Nous avons eu l'occasion de prendre des mesures pour un large éventail d'emplacements de klaxons. Même si nos travaux portaient surtout sur les trains de voyageurs, nous nous sommes quand même intéressés à quelques trains de marchandises, question de vérifier si les mêmes

sensibilités pouvaient être observées. L'annexe E présente des photos des locomotives et des emplacements de klaxon étudiés. Les voitures à cabine de commande de GO Transit et une des locomotives GO portaient le klaxon sur l'arête supérieure du pare-brise de la cabine. Dans le cas de la locomotive du train LRC de VIA Rail (qui n'a été en service que pendant les premiers mois de l'étude), le klaxon était placé sur le toit de la cabine de conduite, à environ un mètre du bord avant. La ligne de toit était plane et l'arête avant était arrondie. Les locomotives F59 de GO Transit, les locomotives F40 de VIA Rail et les locomotives de marchandises GP9 étaient toutes équipées d'un klaxon monté directement derrière l'échappement. De plus, beaucoup de ces locomotives étaient équipées d'un appareil de conditionnement d'air monté sur le toit de la cabine, en avant de l'échappement. Sur les nouvelles locomotives Genesis de VIA Rail, le klaxon était situé du côté droit par rapport à l'axe central, dans une cavité qui faisait que certains des cornets étaient partiellement obstrués. En amont de cette cavité, la ligne de toit était unie. Dans le cas des locomotives de marchandises SD40, le klaxon était placé sur le toit, à gauche par rapport à l'axe central (un à 8,7 m et l'autre à 12,2 m du devant de la locomotive). Les locomotives F59 de West Coast Express (WCE), de fabrication récente, étaient munies d'un klaxon complètement encastré derrière l'échappement du moteur. Quant aux locomotives de marchandises Dash 9, leur klaxon était aussi dans une cavité située au milieu de la locomotive, mais en avant de l'échappement du moteur. Le klaxon des locomotives SD70 était placé dans une cavité située derrière l'échappement, mais plus loin de la face avant de la cavité que dans le cas des autres locomotives.

4.4.1.1 Comparaison des klaxons à 3 cornets

Les courbes polaires d'un éventail de vitesses du train et d'emplacements du klaxon sont présentées ci-dessous. Il convient de noter que ces tracés valent pour la vitesse à laquelle les mesures ont été prises. La vitesse du train influe sur la puissance acoustique efficace à l'avant, selon une relation non linéaire examinée au paragraphe 4.4.2.

La figure 19 illustre la baisse d'intensité du signal en avant de la locomotive, pour deux types de locomotives de trains de voyageurs grande vitesse (vitesse nominale de 90 mi/h). Comme il a été mentionné en 4.2, le klaxon des locomotives F40 est situé derrière l'échappement, tandis que sur les locomotives LRC, il est situé sur le toit de la cabine. Les graphes donnent le niveau sonore équivalent à 30,5 m (100 pi) produit par le klaxon pour des angles croissants par rapport à la direction avant (angle nul). Ils concernent deux locomotives F40 différentes, mesurées à deux passages à niveau. La vitesse nominale est de 90 mi/h (vitesses réelles de 89 mi/h au passage à niveau South Blair et de 92 mi/h au passage à niveau Oliver). Les mesures ont été faites sur un côté seulement du passage à niveau : on suppose que lorsque le klaxon est situé dans l'axe central de la locomotive, les mesures de l'autre côté sont symétriques. La caractéristique est telle que l'intensité du signal vers l'avant est de beaucoup inférieure à l'intensité minimale recommandée, et que le klaxon ne réalise sa pleine puissance qu'à +/-40 degrés de l'avant. La caractéristique du LRC a été mesurée au passage à niveau South Blair à 91 mi/h (en décélération). Peu après le début de l'étude, VIA Rail remplaçait ses locomotives LRC par des locomotives Genesis, plus récentes. C'est pourquoi nos données concernant les locomotives LRC sont plutôt limitées.

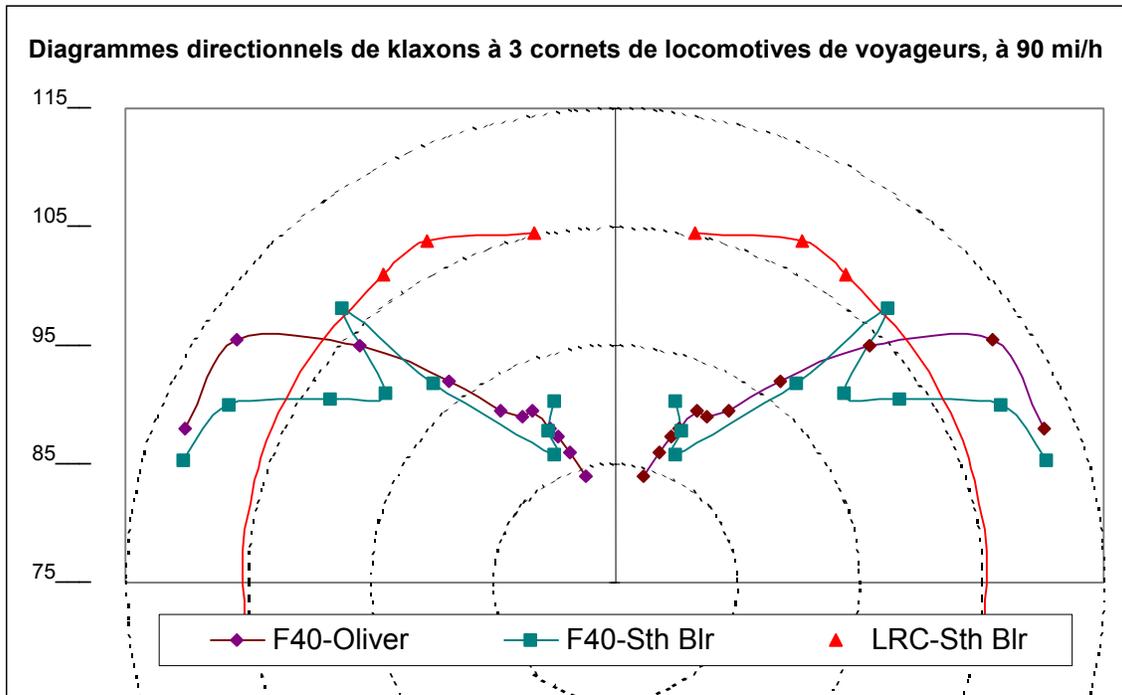


Figure 19 Courbes polaires de klaxons à 3 cornets de locomotives de trains de voyageurs

La figure 20 présente les courbes polaires d'un certain nombre de locomotives de marchandises équipées de klaxons à 3 cornets. On peut constater la similitude des résultats entre la locomotive GP9 et les locomotives F40 et F59PH, dont les klaxons sont situés au même endroit. Les autres locomotives de marchandises affichaient une hausse plus rapide du niveau acoustique à mesure que l'angle augmentait. La SD40, dont le klaxon est situé à gauche de l'axe central, affiche une efficacité réduite à de faibles angles du côté gauche de la locomotive, malgré l'absence d'obstacle entre le klaxon et le sonomètre. Cela concorde avec les résultats obtenus avec les klaxons à 5 cornets (voir 4.4.1.2).

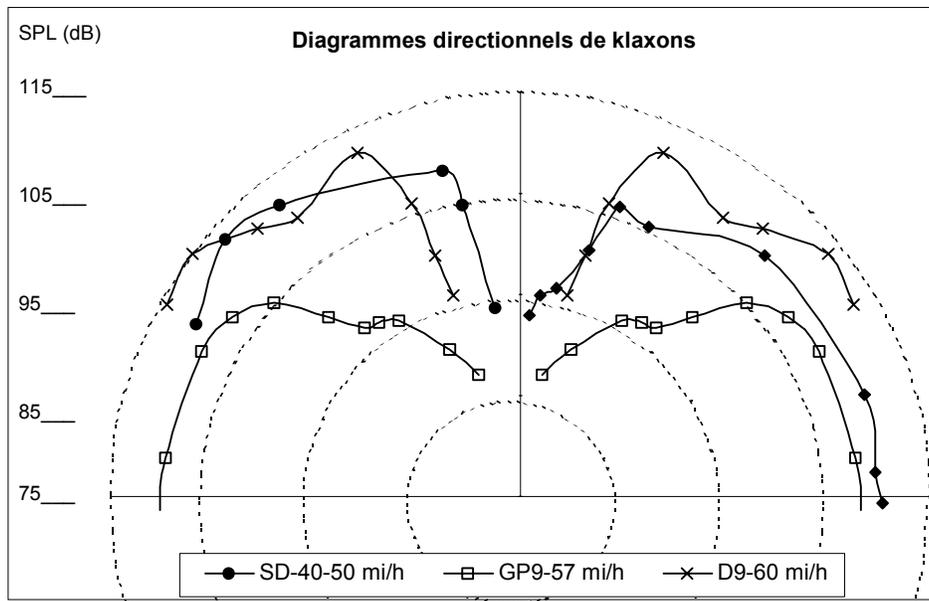


Figure 20 Courbes polaires de klaxons à 3 cornets de locomotives de trains de marchandises

4.4.1.2 Comparaison de klaxons à 5 cornets

Les locomotives F59 de GO Transit sont équipées d'un klaxon à 5 cornets monté au même endroit que sur la locomotive F40 de VIA Rail (figure 21). Au moment de l'étude, GO exploitait aussi une locomotive louée dont le klaxon était installé sur l'arête avant du toit de la cabine de conduite.



Figure 21 Photo de klaxon en milieu de locomotive

La figure 22 reproduit les diagrammes directionnels des deux emplacements de klaxons, sur des trains qui se déplaçaient à vitesse moyenne (35 à 50 mi/h). L'atténuation du signal en avant du klaxon situé en milieu de locomotive est évidente.

Le diagramme directionnel du klaxon de la locomotive Genesis de VIA Rail à 75 mi/h est illustré à la figure 23. Encore là, le signal est atténué à l'avant du klaxon placé en milieu de locomotive. Il est toutefois intéressant de noter que le signal est davantage atténué du côté où le klaxon est monté (à droite) que de l'autre côté.

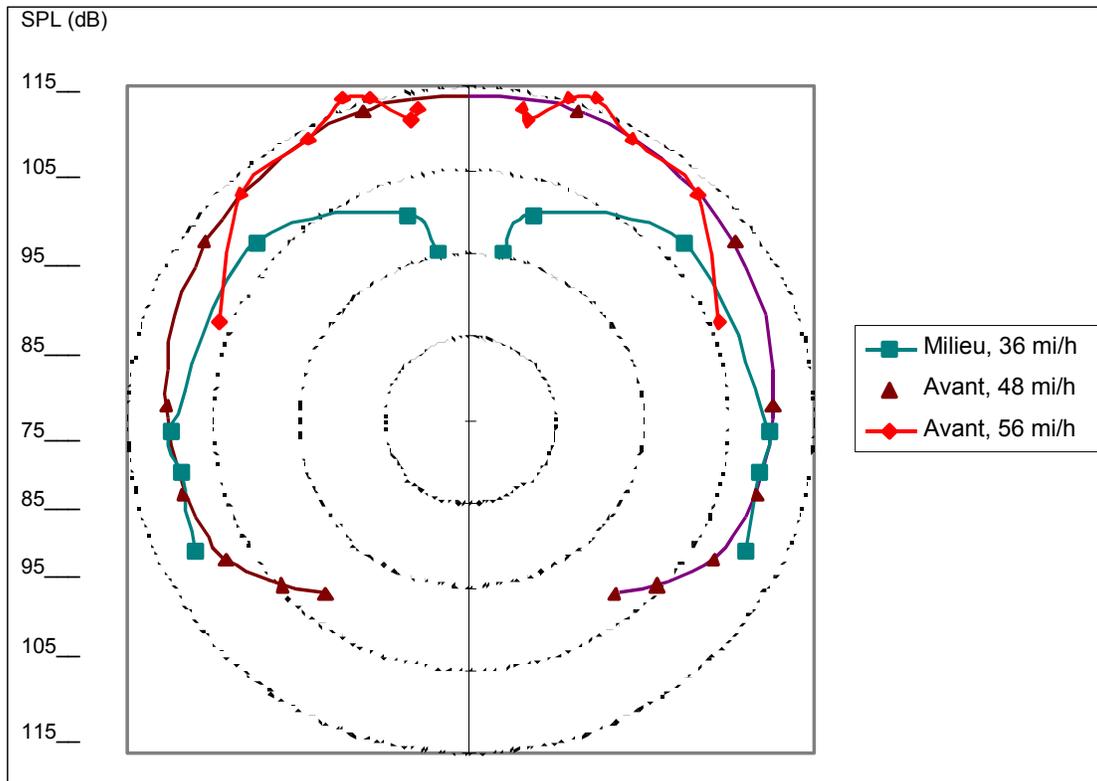


Figure 22 Diagramme directionnel d'un klaxon à 5 cornets, à vitesse moyenne

4.4.2 Influence de la vitesse

La gamme des vitesses associées à l'emplacement des klaxons étaient suffisamment étendue pour que l'on puisse supposer une influence de la vitesse du train sur l'intensité du signal. Dans le cas des klaxons montés à l'avant de la locomotive (ou du véhicule de tête), la vitesse n'influaient pas de façon significative sur le niveau sonore. Mais pour tous les klaxons situés en retrait par rapport à l'avant de la locomotive, le niveau sonore en avant de la locomotive se dégradait à mesure que la vitesse augmentait. Comme nos mesures ont été prises sur des trains en service payant, il nous manque des points de donnée que nous aurions aimé obtenir pour certaines combinaisons de variables. L'ensemble de données le plus complet concerne les trains de voyageurs, qui étaient les seuls à dépasser les 60 mi/h lors de nos essais. Néanmoins, tous les emplacements de klaxon en milieu de locomotive sont associés à une atténuation du son en avant

du train, et cette atténuation est supérieure à celle documentée lors d'essais statiques, ce qui concorde avec l'ensemble de données relativement complet dont nous disposons pour les locomotives de trains de voyageurs.

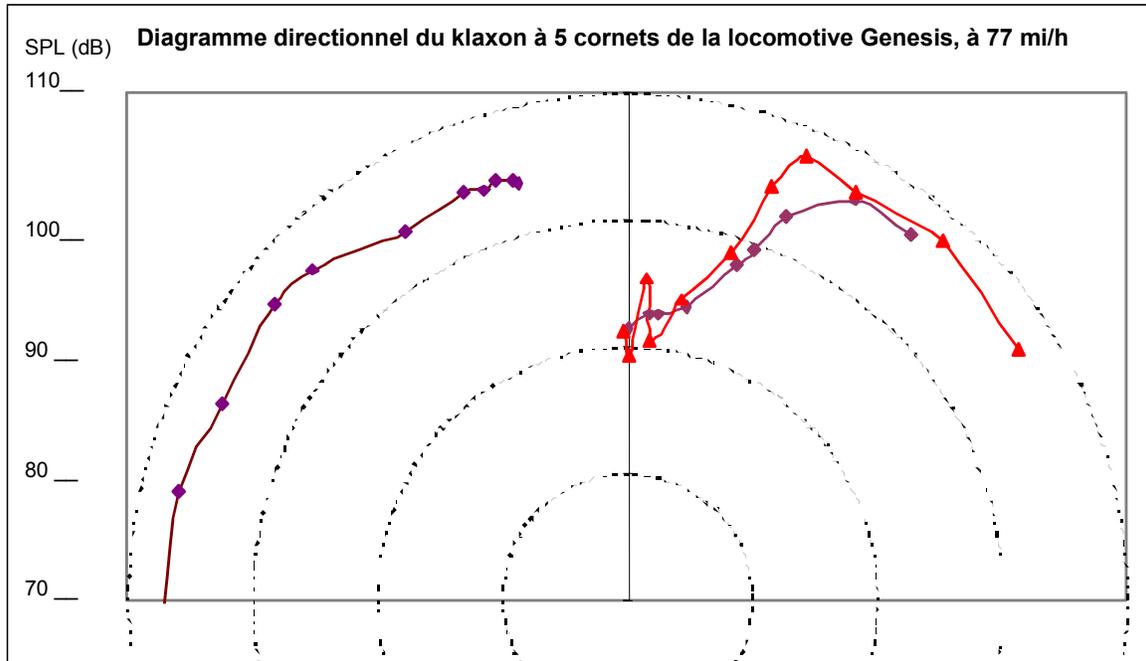


Figure 23 Diagramme directionnel du klaxon à 5 cornets de la locomotive Genesis

La caractéristique de l'atténuation du son en fonction de la vitesse est illustrée à la figure 24 pour la locomotive F59 de GO Transit (klaxon à 5 cornets, derrière l'échappement). La courbe atteint un plateau entre 45 et 100 km/h, puis continue à fléchir à mesure que la vitesse augmente au delà de 100 km/h. Il convient de noter encore une fois que cette caractéristique de l'atténuation du son est dérivée d'essais en service réel à différents endroits et à différentes heures, et que l'on ne peut s'attendre au degré d'exactitude que permettent d'obtenir un schéma expérimental et des conditions contrôlées. Il reste que cette caractéristique est représentative de l'atténuation du son observée pour plusieurs locomotives à plusieurs sites. Elle concorde également avec les mesures prises par Travail Canada (Trav) lors d'essais contrôlés menés à l'aide d'un klaxon monté sur le côté – la «zone d'essai Trav» indiquée à la figure 24 correspond à la gamme des mesures indiquées à la figure 11, pour les distances allant de 50 m à 400 m.

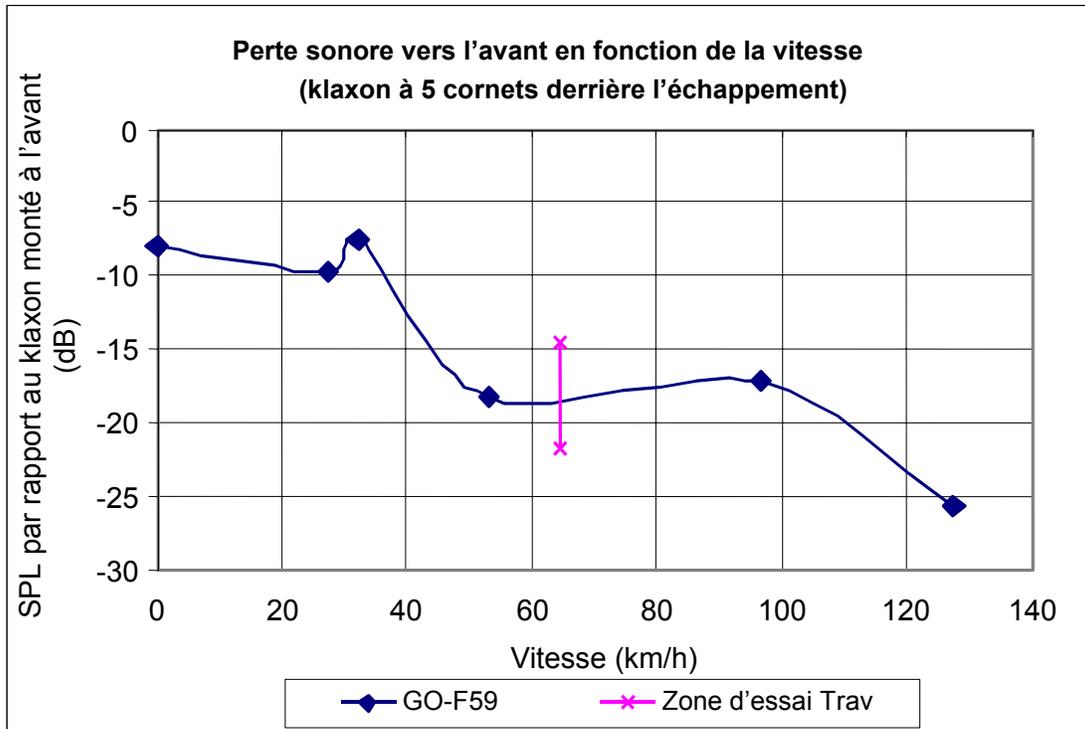


Figure 24 Influence de la vitesse sur l'atténuation du son vers l'avant

Nous croyons que la figure 24 est une représentation raisonnablement fidèle de l'influence de la vitesse sur les klaxons placés directement derrière l'échappement. Le son est davantage atténué lorsque le klaxon est situé derrière l'échappement du moteur, mais il semble également y avoir un lien avec la turbulence de l'air éventuellement causée par des appareils montés sur le toit ou par des changements abrupts dans la ligne de toit. L'atténuation due à la turbulence normale du vent a été documentée [Daigle, 1979]. Nous insistons encore une fois sur le fait que l'atténuation du son se produit seulement vers l'avant. Le positionnement du klaxon en milieu de locomotive n'a aucune influence sur le niveau sonore sur les côtés (si ce n'est qu'il peut l'amplifier, à certains angles latéraux).

L'atténuation du son projeté vers l'avant, illustrée par les courbes polaires des locomotives SD40 et Genesis (figure 20 et figure 23) met en évidence une influence de la vitesse, même en l'absence de tout obstacle entre la source et l'auditeur. Le son émis par les deux klaxons est atténué à des angles faibles par rapport au côté de la locomotive où ils sont montés. Cela nous amène à penser que, outre la turbulence de l'air, il pourrait y avoir un effet de diffraction dû au gradient de vent net généré par le déplacement de la locomotive dans l'air. On sait que sous l'effet de gradients de vent de face, le son remonte, en vertu d'une propriété connue sous le nom de réfraction [Lamancousa, 2000]. Le gradient de la vitesse nette de l'air dans lequel se propage le son, le long de la caisse de la locomotive, augmente en raison directe de la distance par rapport à la caisse (voir la figure 25). Il se pourrait donc que le son du klaxon s'éloigne de la caisse de la locomotive en vertu de ce mécanisme de réfraction acoustique.

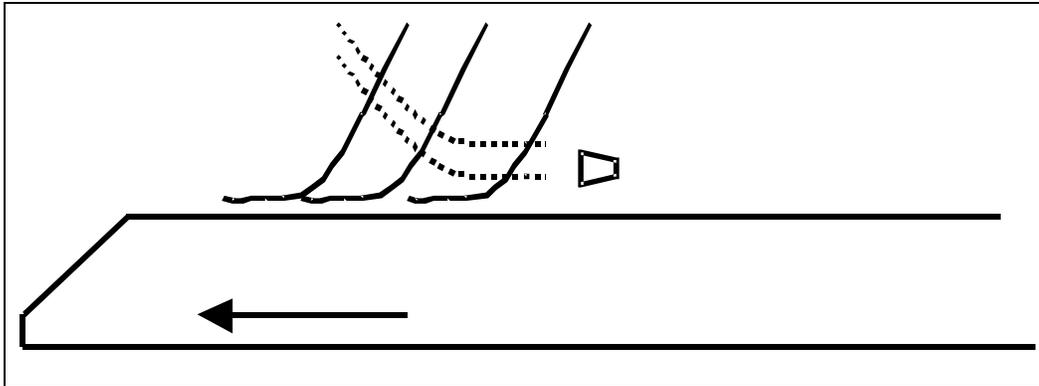


Figure 25 Illustration de la réfraction du son du klaxon

On s'attendrait à ce que des toits à surface unie et des klaxons surélevés limitent la turbulence de l'air et la réfraction acoustique. Mais même lorsque le klaxon est monté de façon à assurer une trajectoire libre entre le klaxon et l'auditeur, on note encore une atténuation du son. VIA Rail a augmenté la hauteur du klaxon sur une de ses locomotives Genesis de façon à ménager une portée acoustique sans obstacle à l'avant de la locomotive pour les 5 cornets – dans la cavité où le klaxon est normalement logé, quatre cornets sont partiellement obstrués et un l'est complètement. Or, malgré le rehaussement du klaxon, une atténuation du son vers l'avant était observée, même du côté de la locomotive où le klaxon était monté.

La figure 26 résume l'influence de la vitesse du train et de la hauteur du klaxon sur les caractéristiques d'avertissement, à des délais d'avertissement d'environ 4 secondes, pour les klaxons de la locomotive Genesis comparativement à un klaxon monté à l'avant. Le choix du délai de référence de 4 secondes n'a pas de signification particulière : il s'est imposé de lui-même car, sur tous les trains, le klaxon était actionné à 4 secondes de l'arrivée au passage à niveau.

Comme l'indiquent les barres du niveau sonore total, à droite sur la figure 26, le fait de hausser le klaxon n'augmente que de 6 dB le niveau sonore, lequel demeure de 8 dB inférieur à celui produit par un klaxon monté à l'avant, à vitesse égale. Par ailleurs, le rehaussement du klaxon influe fortement sur le contenu hautes fréquences. Ainsi, les barres vertes et rouges correspondant au tiers d'octave de 4 000 Hz montrent que le klaxon haussé produit, à 92 mi/h, un niveau sonore de 25 dB supérieur à celui produit par un klaxon non haussé, à une vitesse semblable, soit 87 mi/h. D'où une plus grande efficacité d'avertissement. Ce résultat est davantage commenté au paragraphe 5.1.3, qui traite de l'évaluation des besoins d'avertissement.

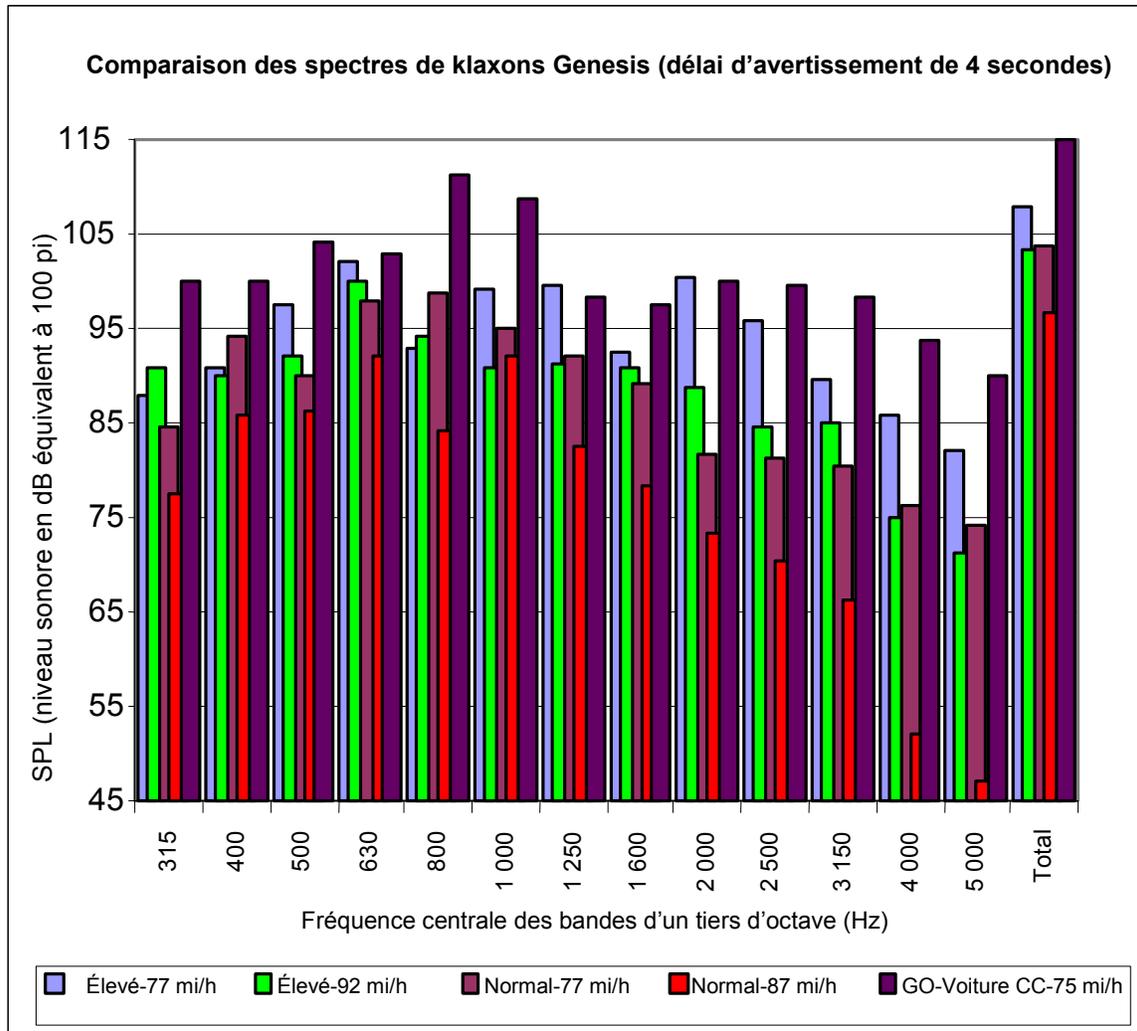


Figure 26 Influence de la vitesse/hauteur du klaxon - Locomotive Genesis

4.5 Influence des conditions météorologiques et de la géométrie des approches routières

Lors des essais en service payant, nous avons délibérément évité les conditions de vent fort. En nous limitant aux conditions de vent faible, nous avons une meilleure indication de ce qu'est le signal moyen. On sait que les gradients de vent et de température font fléchir la trajectoire des sons, un peu à la manière dont le verre réfracte la lumière. Ainsi, les courbes polaires établies à partir de données obtenues par vent faible afficheront de plus grandes fluctuations dans des conditions de vent (et, vraisemblablement, de température) différentes. L'influence du vent est davantage sensible lorsque le klaxon est monté derrière des saillies (ou d'autres éléments faisant écran). Il est plausible que le klaxon de la locomotive Genesis, qui est monté en milieu de locomotive hors de tout renforcement, soit le plus sensible aux effets du vent et de la température. Mais tous les emplacements de klaxon associés à une obstruction quelconque afficheront à coup sûr une sensibilité au vent.

La figure 27 illustre l'influence du vent mise en évidence par des essais menés à 15 minutes d'intervalle sous des vents de 13 km/h en moyenne (au niveau du sol), avec des rafales à 19 km/h. Même si ces conditions ne satisfaisaient pas nos critères, les mesures donnent une idée des effets du vent et du gradient de vent. Le vent soufflait dans le sens de la voie, de sorte qu'un train se dirigeant vers l'est avait un vent arrière, tandis qu'un train roulant vers l'ouest avait un vent de face. L'effet du vent est notable : il entraîne un écart de 20 dB entre les sens de déplacement du train, à l'angle de mesure le plus faible. De la même manière, on peut s'attendre que les vents latéraux réduiront ou exacerberont l'angle auquel les courbes polaires sont maximales. Il est donc plausible que dans certaines situations, les klaxons montés en milieu de locomotive produisent une intensité plus élevée ou plus faible que nos mesures, prises par vent faible, laissent supposer. Il convient néanmoins d'insister sur le fait que l'influence du vent est plutôt négligeable lorsque les klaxons sont montés à l'avant, là où la trajectoire du son est directe. Ce sont les emplacements qui obligent le son à contourner des obstacles qui affichent la plus grande sensibilité aux conditions de vent.

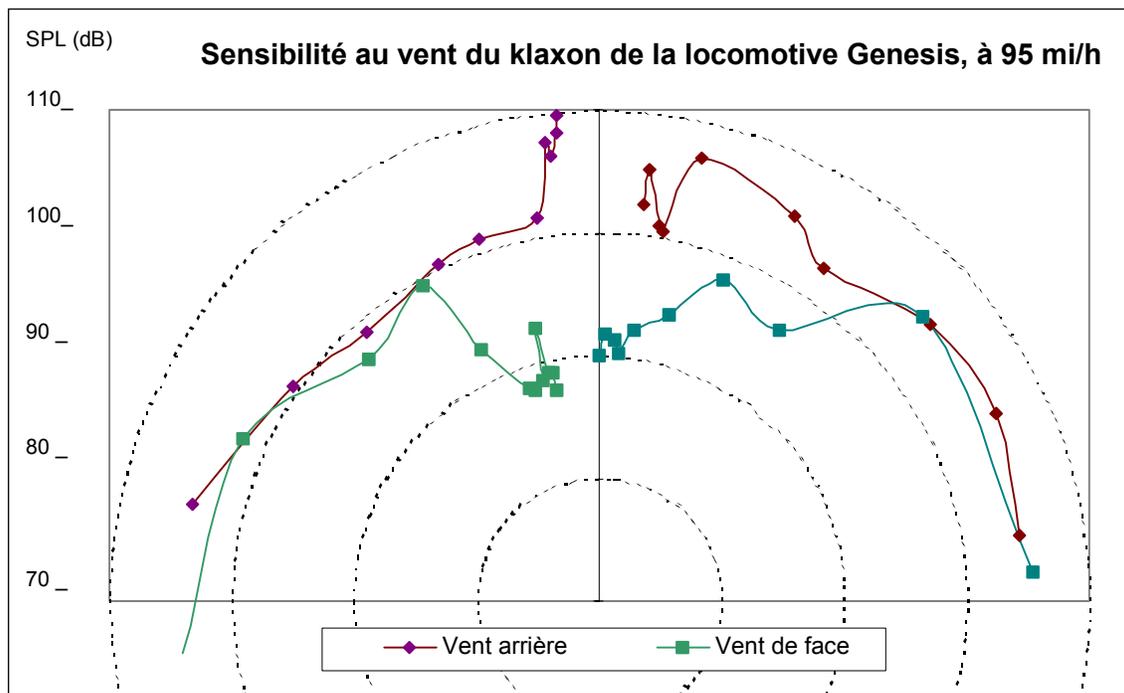


Figure 27 Sensibilité au vent du klaxon de la locomotive Genesis, à 95 mi/h

La géométrie des approches routières a une influence qui ne se limite pas à l'effet de sol, discuté en 4.6. Ainsi, une approche routière surélevée par rapport à la voie ferrée pourrait pallier l'effet d'écran associé aux renforcements, dans le cas des emplacements de klaxon en milieu de locomotive, tandis qu'une voie ferrée surélevée par rapport à la route exacerberait cet effet. La première hypothèse s'est vérifiée lors d'essais statiques menés à l'aide d'un sonomètre monté sur une tige à une hauteur de 16 pi [Fann, 2001]. Tout comme dans le cas de l'influence du vent, il se peut qu'il existe des géométries plus favorables aux klaxons montés en milieu de locomotive que le laissent penser nos mesures en service réel. Mais de tels scénarios

demeureront une minorité, et ils seront toujours compensés par un nombre égal de scénarios qui seront pires que les conditions moyennes dans lesquelles nos mesures ont été prises.

La courbe du vent arrière représentée à la figure 27 offre un éclairage intéressant sur le mécanisme de réfraction qui agit sur le son émis par le klaxon. Quand la locomotive s'approche, l'angle de réfraction n'est pas suffisant pour rabattre le son vers le sonomètre. Plus la locomotive est loin, plus le SPL (équivalent à 100 pi) du son qui atteint le sonomètre est élevé, si bien qu'à son premier coup (à environ 400 m), le klaxon émet un signal de 110 dB. Le *gradient de vent* réel n'était pas connu; mais il est possible que le gradient associé à une vitesse de vent au sol de 13 km/h ait besoin de 400 m pour rabattre la trajectoire du son suffisamment pour compenser le gradient de vent aérodynamique de 145 km/h agissant sur les 10 m de longueur de la caisse de la locomotive que le son doit d'abord franchir.

Un klaxon monté à l'avant est soustrait à l'effet d'écran induit par la caisse de la locomotive, ainsi qu'aux influences de la turbulence de l'air et de la réfraction. Pour soustraire à ces influences les klaxons montés en milieu de locomotive, il faut les hausser. Il nous semble que les dégagements accrus ménagés sur de nombreuses voies principales, pour autoriser le passage de porte-conteneurs à deux niveaux et de wagons porte-automobiles à trois niveaux, permettraient de hausser des klaxons en milieu de locomotive jusqu'à une hauteur où leur efficacité d'avertissement serait comparable à celle des klaxons montés à l'avant. Nous avons évalué avec un certain succès l'efficacité d'une telle intervention, en extrayant le klaxon d'une locomotive Genesis de VIA Rail du renforcement dans lequel il se trouve normalement. Mais nous n'avons pas pu mener d'essai pour déterminer à quelle hauteur il faut élever le klaxon pour obtenir la même efficacité qu'avec un klaxon monté à l'avant.

4.6 Hauteur du klaxon monté à l'avant

La hauteur d'un klaxon monté à l'avant met en jeu deux influences possibles : l'effet d'écran et l'effet de sol. Plus le klaxon est bas, plus le risque d'un effet d'écran augmente, le son pouvant alors plus facilement heurter les wagons stationnés sur la voie ou encore les remblais de pierre ou levées de terre le long de la voie. Il serait donc préférable de placer le klaxon le plus haut possible. De plus, les locomotives de trains de marchandises, qui doivent parfois faire marche arrière, émettraient un signal plus efficace vers l'arrière si leur klaxon était monté sur le toit. L'effet de sol vient du fait que l'onde de pression acoustique perçue par l'oreille est une combinaison des ondes de pression qui se propagent en ligne droite depuis la source et des ondes qui sont réfléchies par le sol. L'onde réfléchie parcourt une trajectoire plus longue et perd de son intensité en raison de sa dissipation à la surface du sol (voir la figure 28).

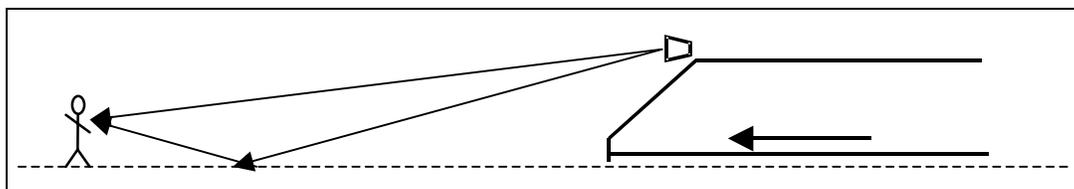


Figure 28 Illustration de l'effet de sol sur la perception du son

L'allongement de la trajectoire parcourue par l'onde réfléchi entraîne un signal composite dépendant de la fréquence. Certaines fréquences peuvent être atténuées et d'autres amplifiées, et l'analyse de ce phénomène est relativement complexe [Rudnick, 1947]. Comme l'effet de sol dépend du type de sol, de la pente et de la différence de niveau entre la source et l'auditeur, il n'est pas possible de généraliser les conséquences de cet effet. Mais un piéton ou un intrus sur la voie représente une condition relativement uniforme. Nous avons donc évalué l'effet de sol associé à différentes hauteurs de montage du klaxon sur le signal d'avertissement perçu par un piéton/intrus se trouvant sur la voie en avant d'une locomotive. Nous avons utilisé à cette fin l'algorithme de Rudnick mis en œuvre dans le *Community Noise Model* de l'Université de Central Florida [2002]. Le tableau 5 résume les valeurs implicites utilisées pour notre analyse.

Tableau 5 Paramètres utilisés pour le calcul de l'effet de sol

Paramètre	Valeur implicite
Hauteur – Montage sur le toit de la cabine	4,4 m
Hauteur – Montage sur le capot	1,7 m
Hauteur – Montage sur la mâchoire d'attelage	0,9 m
Taille du sujet	1,5 m
Impédance - Effet de sol dû à la voie	2 000 CGS Rayls
Gradient de la voie	0,0 p.100

L'effet de sol prévu dans la plage des fréquences du klaxon et pour chacune des trois hauteurs de montage est illustré à la figure 29. On peut y observer que plus le klaxon est bas, plus l'atténuation est importante. Lorsque la locomotive s'approche du sujet, la caractéristique de la plus grande hauteur de montage se complexifie. Le tableau 6 compare, pour l'ensemble du spectre intégré, les SPL pondérés en A des signaux auditifs perçus par un sujet mesurant 1,5 m, aux trois distances illustrées à la figure 29 (100 m, 160 m et 260 m). Les caractéristiques de l'effet de sol de la figure 29 sont appliquées au spectre de fréquences des klaxons K3L et K5L.

Comme on le voit, le positionnement du klaxon sur le toit de la cabine offre un avantage par rapport aux deux autres emplacements, dans tous les cas de figure sauf un (K5 à 100 m). C'est à 260 m que l'avantage du montage sur la cabine plutôt que sur la mâchoire d'attelage est le plus sensible (8 dBA). Il est à noter que les résultats de l'analyse affichent une sensibilité semblable (mais plus accentuée) que les mesures faites sur le terrain par Rapoza et Fleming [2001] pour le Volpe Center. Leurs données ont révélé une augmentation de l'atténuation du son par doublement de la distance de 1,3 dBA et 2,4 dBA, respectivement, pour les emplacements «capot» et «mâchoire d'attelage», par rapport au «toit de la cabine». Ces résultats sont fondés sur des mesures prises sur des distances de 30,5 à 122 m, ce qui correspond à l'extrémité basse et la moins sensible de notre domaine d'analyse.

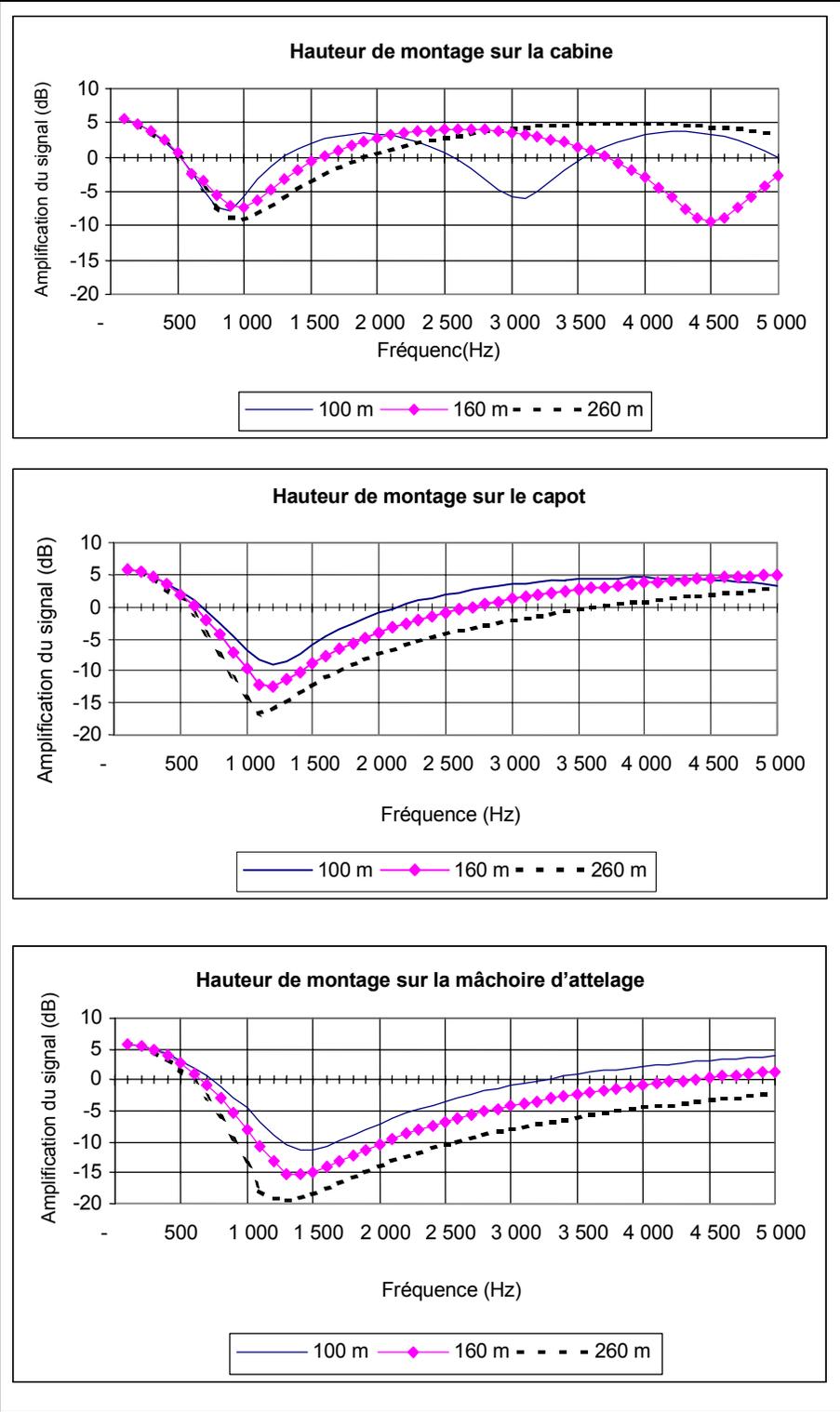


Figure 29 Influence de la hauteur du klaxon sur l'effet de sol

Tableau 6 Influence de la hauteur sur l'effet de sol, SPL sur l'ensemble du spectre (dBA)

Type de klaxon	K5L			K3L		
	100 m	160 m	260 m	100 m	160 m	260 m
Distance						
Montage – Mâchoire d'attelage	-1,2	-3,6	-6,4	-3,1	-5,4	-7,9
Montage – Capot avant	1,4	-0,1	-2,9	0,1	-1,3	-3,9
Montage – Cabine	0,5	1,5	1,8	0,3	0,3	0,4
Avantage moyen – Cabine						
Cabine – Capot	-0,9	1,6	4,7	0,3	1,6	4,2
Cabine – Mâchoire d'attelage	1,7	5,1	8,2	3,5	5,7	8,3

On constate également que les piétons aux passages à niveau, les employés en bordure de la voie et, éventuellement, les voyageurs dans les gares seraient exposés à des niveaux sonores plus élevés si le klaxon était plus bas. La réglementation du Royaume-Uni sur les klaxons [U.K. Railway Group, 1995] prévoit un plafond de 135 dB en bordure de voie lors d'un essai au passage d'un train à 10 km/h (à 1,5 m au-dessus du sommet du rail, ainsi qu'à 1,2 et 2,0 m du rail le plus proche, à l'horizontale). Un klaxon monté au niveau du toit respecterait cette règle, mais pas un klaxon monté à 1,5 m de hauteur.

Tous les facteurs susmentionnés militent en faveur d'un klaxon monté sur le toit. Par contre, un klaxon plus bas pourrait mener à une diminution du niveau sonore dans la cabine de conduite et de la gêne due au bruit dans la collectivité. Les résultats des essais réalisés par le Volpe Center [Rapoza et Fleming, 2001] révèlent une diminution de 4 dB du niveau sonore à l'intérieur de la cabine lorsque le klaxon est monté à la hauteur de l'attelage. Dans le cas «montage – capot», le klaxon était monté sur le capot. Il est possible qu'un klaxon monté à l'avant du capot produirait un SPL moins élevé dans la cabine. Par ailleurs, pour les trains qui engendrent une forte gêne due au bruit dans la collectivité, le capot offre la possibilité de renfoncer le klaxon de façon à créer un effet d'écran latéral, et de diminuer ainsi le bruit pour les riverains. Il est possible d'atténuer considérablement la gêne due au bruit dans la collectivité en ne diminuant que peu l'efficacité d'avertissement des klaxons, et nous recommandons que le montage des klaxons sur le capot soit envisagé pour les locomotives qui desservent des zones particulièrement vulnérables au bruit. Pour ce qui est des locomotives existantes, il se peut que les coûts d'installation en rattrapage soient prohibitifs au point où il faille opter pour un autre emplacement où les seuils d'efficacité peuvent être atteints à meilleur coût.

5 EFFICACITÉ DES KLAXONS DE LOCOMOTIVES

5.1 Comparaison des spectrogrammes acoustiques

5.1.1 Avertissement nécessaire pour les piétons et les intrus

Dans certains cas, les dispositifs d'avertissement sonore constituent les seuls moyens d'alerter les piétons (qui marchent le dos tourné au train ou qui traversent la voie alors qu'un autre train leur obstrue la vue) de l'arrivée d'un train. Bien souvent, l'avertissement sonore a des limites. Ainsi, il faut que l'équipe de conduite voie les intrus avant de pouvoir actionner le dispositif d'avertissement sonore. Elle peut, en raison d'une visibilité médiocre, notamment dans les courbes, ne pas voir un piéton à temps pour l'avertir suffisamment d'avance. Même lorsque l'équipe décele la présence de piétons à temps, le vent et le bruit peuvent empêcher le dispositif d'avertissement même le plus puissant d'être entendu en temps voulu. Par ailleurs, un dispositif d'avertissement sonore et souvent le seul avertissement possible. Nous remarquons que la situation des intrus portant des écouteurs ou conduisant une motoneige peut être assimilée à celle des occupants de véhicules arrêtés aux passages à niveau (paragraphe 5.2.2). C'est pourquoi nous n'examinerons ici que les conditions de plein air.

Nous avons espéré que les caméras de surveillance vidéo installées dans des locomotives pendant l'étude nous auraient permis d'avoir une base pour définir des délais d'avertissement et de réaction. Malheureusement, seuls quelques incidents ont pu être captés sur vidéo. Nous disposons toutefois de suffisamment de données pour conclure que la plage des délais de réaction est assez étalée. Nous avons adopté, pour les dispositifs d'avertissement sonore, un délai de réaction de 3,1 s, tenant compte d'un temps d'alerte de 0,6 s et de 2,5 s supplémentaires pour une confirmation visuelle. Nous avons supposé qu'il fallait 2,5 s supplémentaires pour se mettre à l'abri du danger – soit un délai d'avertissement total de 5,6 s. En l'absence de données pertinentes, cela nous paraît raisonnable. Si le signal est de forte intensité et qu'il y a une certaine urgence perçue, le temps de réaction pourrait être plus court.

Il faut ajouter au temps ci-dessus la temporisation associée à la vitesse du son dans l'air. Le train va parcourir une certaine distance pendant l'intervalle entre l'activation du klaxon et la perception du son par le piéton. L'effet étant proportionnel à la vitesse du train, on obtient l'équation de délai d'avertissement suivante :

$$T_{das} = \frac{T_{rép}}{\left(1 - \frac{V_t}{V_s}\right)}$$

où

T_{das} = délai d'avertissement minimal donné par le dispositif d'avertissement sonore

$T_{rép}$ = délai de réponse minimal du sujet (de 3 à 5,6 s)

V_t = vitesse du train

V_s = vitesse du son dans l'air (331,9 m/s)

On peut voir que, dans le cas d'un train se déplaçant à 161 km/h (100 mi/h), le délai d'avertissement passe de 5,6 s à 6,47 s. Afin de déterminer la distance d'avertissement associée

à chaque vitesse, nous calculons la dissipation du son pour définir l'intensité nécessaire du klaxon aux 30,5 m (100 pi) réglementaires.

5.1.2 Interprétation des spectrogrammes acoustiques

Comme il est indiqué à la section 4.3, une valeur SPL d'énergie acoustique totale présente des avantages analytiques pour certaines comparaisons, mais n'offre pas une image adéquate du mécanisme d'avertissement complexe en cause. Nous faisons appel à des spectrogrammes pour illustrer visuellement les signaux et parfois les comparer. La figure 30 illustre les critères de couleur qui sont utilisés. Le son mesuré à la figure 30 provient d'un klaxon à 5 cornets monté à l'avant d'un train se déplaçant à 58 mi/h. En ordonnée est portée la composante fréquence du signal, qui va de 200 Hz au sommet à 5 000 Hz à l'origine. Cette plage de fréquences englobe la fréquence fondamentale la plus basse des klaxons (311 Hz) et l'harmonique n° 8 de la fréquence fondamentale la plus élevée ($8 \times 622 = 4\,976$ Hz). L'axe horizontal représente l'échelle de temps rajustée de manière à couvrir la séquence sonore du klaxon à l'approche du passage à niveau. La troisième dimension du diagramme est le niveau acoustique du signal perçu, indiqué par les diverses couleurs. Chaque pixel de couleur représente un SPL correspondant à un intervalle de 11 Hz de hauteur et une durée de 85 ms. La barre supérieure montre l'échelle des couleurs. Les niveaux acoustiques inférieurs à 47 dB ne sont pas présents, ce qui, combiné à l'absence de signal en deçà de 200 Hz, élimine du diagramme une grande partie du bruit de fond.

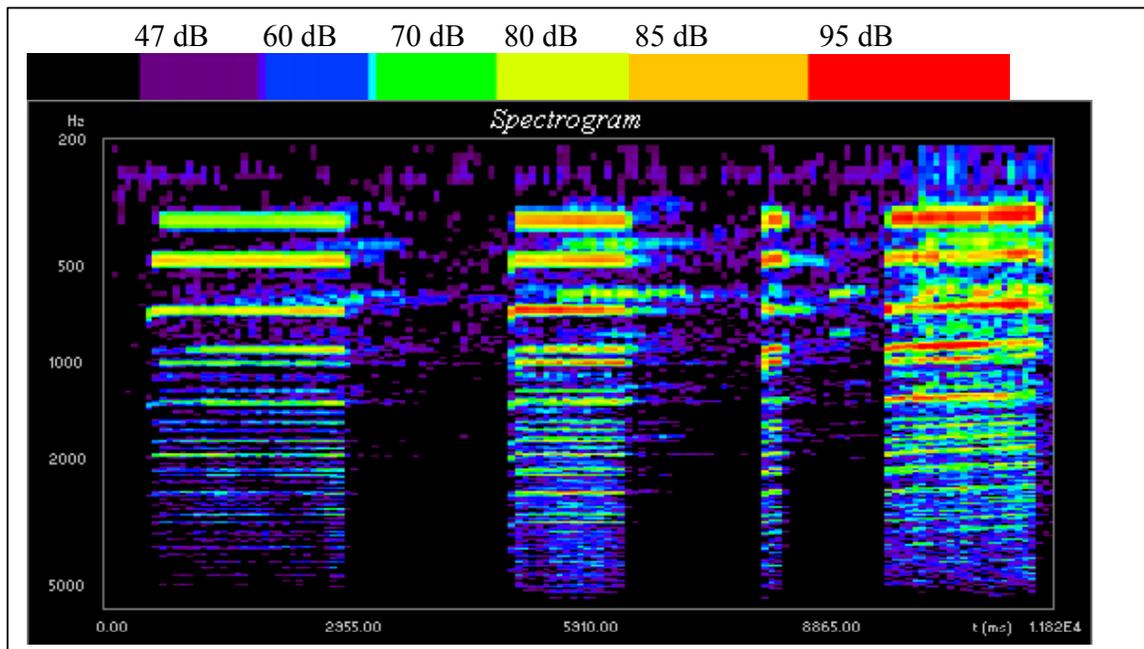


Figure 30 Illustration du code de couleur d'un spectrogramme (klaxon à 5 cornets monté à l'avant)

L'utilisation d'une échelle de couleurs pour l'ensemble du spectre donne une interprétation raisonnable de la détection des signaux à l'intérieur de l'habitacle (tel qu'indiqué au paragraphe 5.2.1 et illustré à la figure 36). Il ne s'agit toutefois pas de la méthode idéale pour

ce qui est de la détection des signaux par les piétons. Le spectrogramme donne quand même une bonne idée de la détectabilité et de l'urgence des divers signaux de klaxon. On peut interpréter grosso modo les couleurs comme suit :

- le mauve représente le seuil d'audibilité pour un piéton dans un milieu extérieur peu bruyant
- le jaune représente le seuil d'avertissement dans l'habitacle d'un véhicule où il y a peu de bruit
- l'orange représente un niveau sonore ayant de bonnes chances d'être détecté à l'intérieur d'un véhicule bruyant et de donner l'alerte dans un véhicule silencieux
- le rouge constitue un niveau sonore donnant l'alerte à l'intérieur de bon nombre de véhicules.

5.1.3 Comparaison des spectrogrammes – cas des piétons et des intrus

L'efficacité d'un dispositif d'avertissement sonore dépend du spectre de fréquences de celui-ci. La propagation du son dans l'atmosphère et l'efficacité de l'oreille humaine sont toutes deux dépendantes de la fréquence. La réponse en fréquence de l'oreille humaine à de faibles intensités sonores est souvent caractérisée par une pondération en A. Le niveau acoustique de 96 dBA requis dans la norme actuelle est dérivé de la sommation logarithmique de toutes les fréquences après pondération de chaque bande de fréquence selon son facteur de filtre A. Les effets combinés du filtre A et de l'absorption à 20 °C à deux valeurs d'humidité relative différentes sont illustrés à la figure 31. On peut voir qu'en été, la transmission d'un son entre sa source et le cerveau atteint son efficacité maximale dans la gamme de fréquences comprise entre 1 000 Hz et 2 000 Hz. L'oreille atténue de plus en plus les fréquences inférieures à 1 000 Hz, et l'atmosphère absorbe de plus en plus les fréquences supérieures à 2 000 Hz. Cela est confirmé par nos expériences sur la perception de l'urgence, selon lesquelles il faut privilégier les signaux dans la gamme des fréquences élevées (de 2 000 Hz à 4 000 Hz).

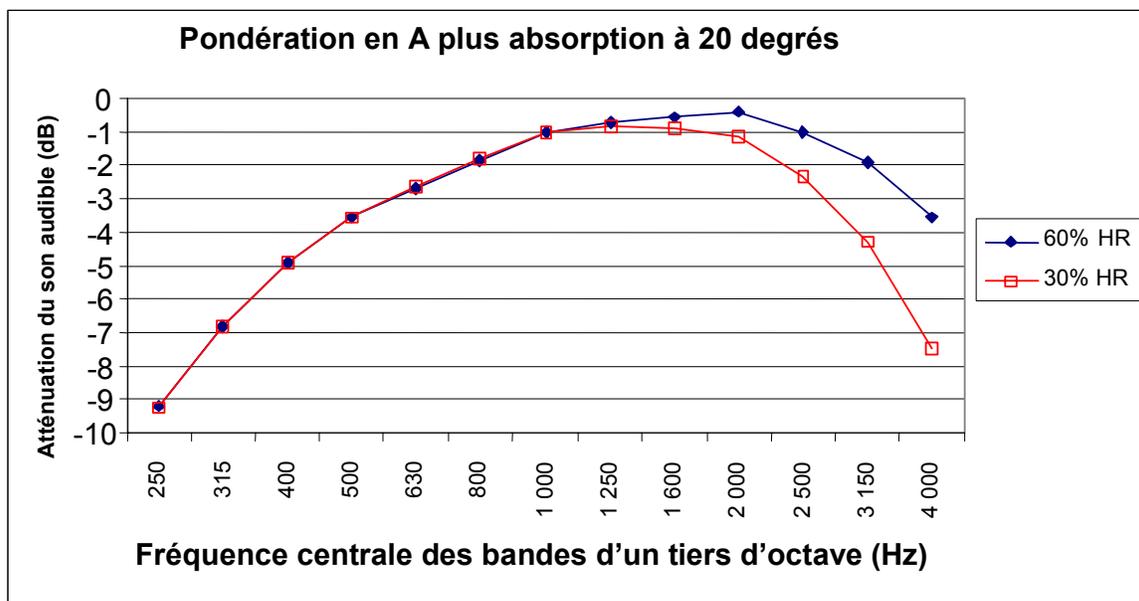


Figure 31 Effet de l'oreille et de l'atmosphère dans l'atténuation du spectre du klaxon

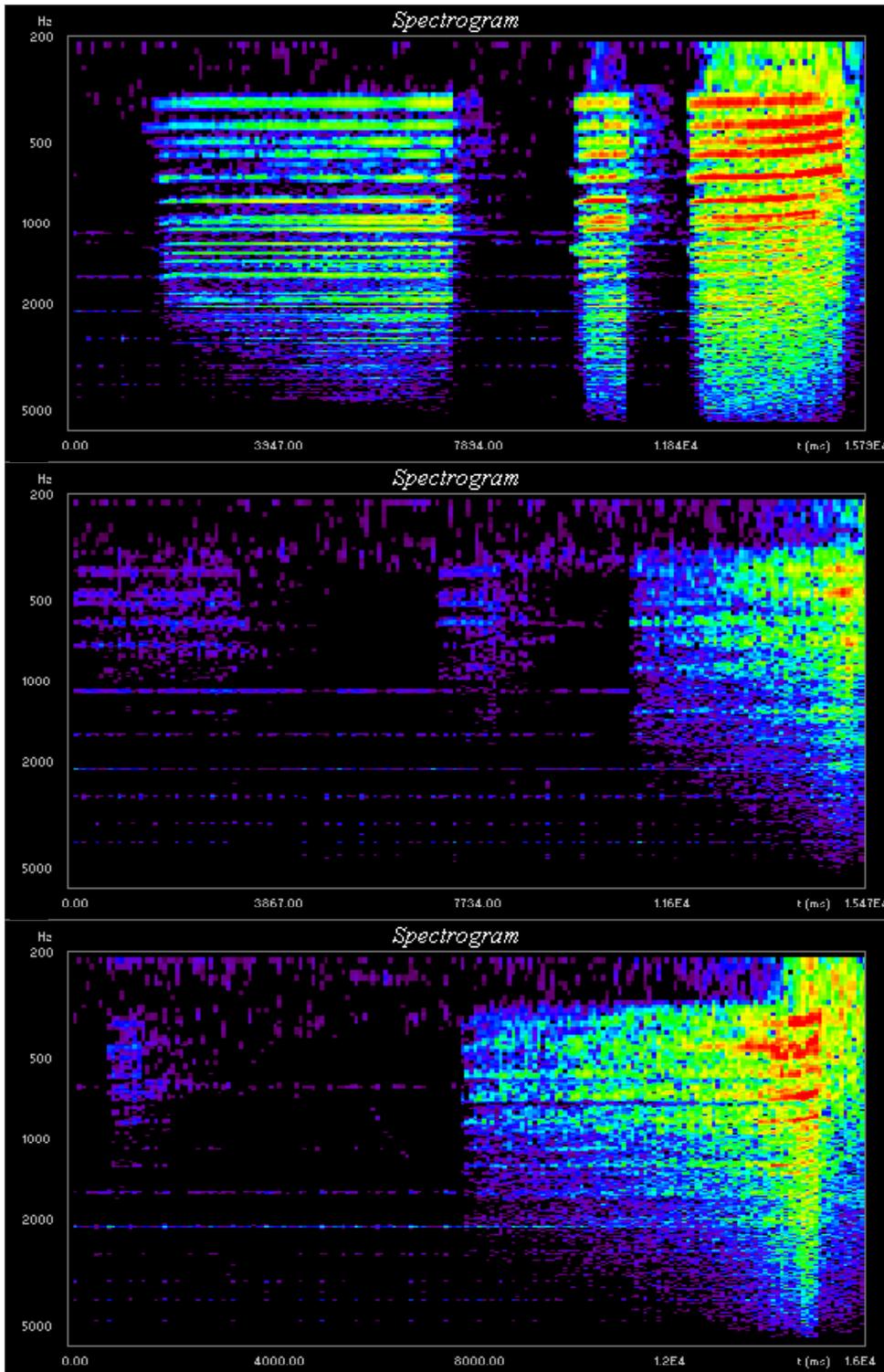
La figure 32 compare les spectrogrammes de deux trains différents s'approchant du passage à niveau de Beechgrove à Scarborough, en Ontario. Pour chaque spectrogramme, la durée est de 15 s. Le sonomètre est placé à proximité (18 m) du passage à niveau et l'angle du son émis par le klaxon est donc faible sur une grande partie de l'approche, ce qui illustre bien ce qu'entendrait un piéton se trouvant près de la voie. La sonnerie du passage à niveau est illustrée dans chaque spectrogramme par les lignes brisées apparaissant entre 1 000 Hz et 5 000 Hz. Le spectrogramme du haut de la figure 32 représente un klaxon à 5 cornets monté à l'avant d'une voiture à cabine de commande, alors que les deux autres représentent un klaxon à 5 cornets aussi, mais monté en milieu de locomotive, derrière l'échappement. La voiture à cabine de commande se déplace à 75 mi/h et les locomotives, à 79 mi/h (spectrogramme du milieu) et à 60 mi/h (spectrogramme du bas), respectivement. La voiture à cabine de commande s'approche du passage à niveau sur une voie qui est courbe là où le son initial du klaxon est émis. Les locomotives arrivent en sens opposé et se déplacent sur un tronçon de voie rectiligne pendant toute la durée de la mesure.

Le klaxon à 5 cornets monté à l'avant de la voiture à cabine de commande, qui se déplace à 75 mi/h, émet un puissant signal sur tout le spectre, qui dépasse les 10 s de délai d'avertissement. Un piéton l'entendrait clairement jusqu'à 4 000 Hz dès le premier coup de klaxon. Le signal serait également entendu à l'intérieur d'un véhicule se trouvant au passage à niveau au moins 10 secondes avant l'arrivée du train, et le niveau d'alerte serait atteint plus de 6 secondes avant l'arrivée du train.

On peut aussi voir que les deux klaxons montés en milieu de locomotive illustrés à la figure 32 sont audibles pour un piéton, mais que l'intensité acoustique est bien inférieure à celle produite par le klaxon monté à l'avant illustré à la figure 30.

La présence de bruit de fond ou le port d'écouteurs rendraient leurs sons inaudibles sur une grande partie de l'approche. Dans un véhicule fermé immobilisé au passage à niveau, on n'entendrait le klaxon qu'au passage de la locomotive. Dans les fréquences hautes, le son manque aussi de la clarté et du contenu spectral qu'on a pu observer dans le spectre du klaxon de la voiture à cabine de commande à la figure 30.

L'expérience sur l'urgence apparente du signal que nous avons menée en laboratoire visait à évaluer différentes compositions de klaxons plutôt que l'urgence associée à des enregistrements faits sur le terrain. L'expérience d'origine mettait en jeu le klaxon à 5 cornets utilisé sur les deux trains de l'étude de Beechgrove (évoquée ci-dessus). Mais l'expérience réalisée en laboratoire utilisait des enregistrements de nouveaux klaxons fixes. Quant aux sons étudiés lors des essais en service réel, ils provenaient de trains à grande vitesse. Toutefois, en appliquant l'équation d'urgence calculée au cours de cette expérience, on peut avoir une idée de l'urgence relative associée aux deux signaux d'avertissement.



Avant,
75 mi/h

Milieu,
79 mi/h

Milieu,
60 mi/h

Figure 32 Spectrogrammes de klaxons à 5 cornets montés à l'avant et en milieu de locomotive

Le tableau 7 présente l'urgence calculée associée aux caractéristiques acoustiques des klaxons, pour des délais d'avertissement donnés. Le klaxon monté à l'avant du train allant à 75 mi/h affiche une caractéristique acoustique qui tombe dans la plage de données des expériences (urgence perçue comprise entre 37 et 72). La valeur négative calculée pour le délai d'avertissement de 5 s du klaxon monté derrière l'échappement de la locomotive se déplaçant à 60 mi/h indique que le spectre sonore se trouve en dehors de la plage de données obtenues lors des expériences en laboratoire. Les calculs donnent toutefois une idée de l'urgence relative associée aux sons émis par les deux klaxons. Nous tenons à faire remarquer que les enregistrements comparés au tableau 7 proviennent du même type de klaxon, et que seul l'emplacement diffère. De plus, la différence de son ne vaut que dans la direction avant; à des angles supérieurs à 40 degrés, les caractéristiques du son sont les mêmes. En ce qui concerne les variables d'urgence, seul le centroïde est différent – le nombre de cornets et la dissonance musicale sont les mêmes.

Tableau 7 Calcul de l'urgence extrapolée pour divers emplacements du klaxon

Emplacement du klaxon	Vitesse du train	Délai d'avertissement	Urgence extrapolée
avant	75 mi/h	5 s	56,5
derrière l'échappement	79 mi/h	1 s	17,5
derrière l'échappement	60 mi/h	5 s	< 0

Un autre facteur non pris en compte dans le calcul de l'urgence, mais qui ressort clairement des spectrogrammes, est la clarté relative des sons. Le caractère intermittent et étouffé du son du klaxon situé derrière l'échappement peut donner l'impression que la source du son est éloignée. La clarté et le contenu élevé en harmoniques du son émis par le klaxon monté à l'avant font percevoir une proximité immédiate du train et une urgence plus grande.

Nous concluons que, même si les deux klaxons peuvent être entendus à temps pour qu'une personne prudente puisse réagir, la nature du son émis par le klaxon situé derrière l'échappement est telle qu'une personne plus audacieuse pourrait être portée à croire que le son ne provient pas d'un train se trouvant à proximité et elle percevrait moins l'urgence que si le même klaxon était monté à l'avant.

5.1.4 Comparaison de spectrogrammes à 70 m du passage à niveau

Le lecteur se reportera à la figure 30 pour obtenir une explication du code de couleur et du contenu des spectrogrammes du présent paragraphe. Le spectrogramme de la figure 30 représente la séquence d'avertissement de la même voiture à cabine de commande GO Transit à klaxon monté à l'avant. Il illustre diverses caractéristiques acoustiques souhaitées pour le klaxon.

- Le signal atteint un contenu élevé en harmoniques au premier coup de klaxon (qui, comme on l'a indiqué auparavant, est donné à environ 300 m du sonomètre). L'harmonique n° 8 de la fréquence fondamentale la plus élevée est audible et donnerait une mesure centroïde élevée, qui concourt de façon importante à conférer un caractère d'urgence au signal.

- Plusieurs sons (de 500 à 2 000 Hz) atteignent un niveau sonore jaune pouvant être détecté à l'intérieur d'une automobile. Le second coup, avec un délai d'avertissement de 6 s, contient certains sons de niveau rouge et beaucoup d'orange.
- La clarté du signal est manifeste dans les longues lignes étroites qui seraient associées à des sons purs constants.

La figure 33 présente les spectrogrammes pour quatre emplacements de klaxon et diverses vitesses de train à l'approche du passage à niveau de South Blair. Les lignes brisées bleu/mauve entre 1 600 Hz et 5 000 Hz dans les spectrogrammes inférieur gauche et supérieur droit sont attribuables au son émis par la sonnerie du passage à niveau, que l'on entend dans ces mesures.

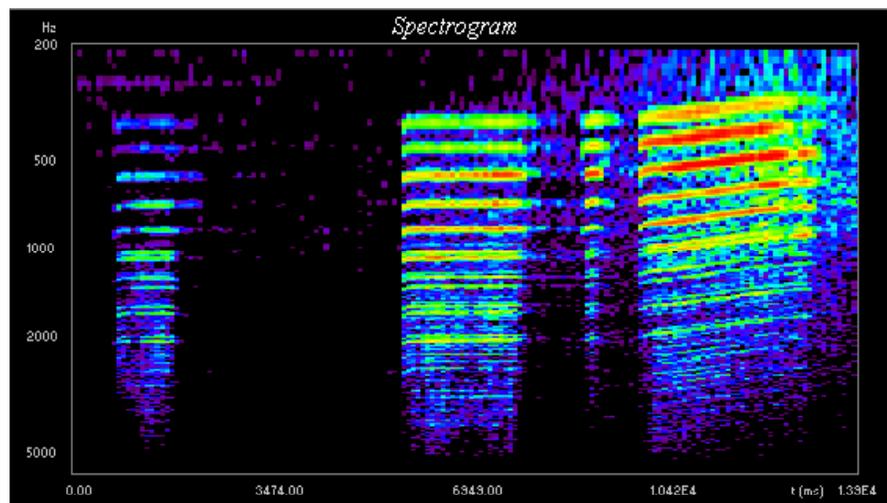
Les deux spectrogrammes de gauche comparent deux klaxons à 3 cornets différents montés sur des trains arrivant de l'ouest. Comme il en a été question au paragraphe 4.2, l'orientation du passage à niveau est telle que le premier coup de klaxon se fait à un angle faible, à environ 400 m du sonomètre, et que le dernier coup se produit à un angle de 120 degrés et à 70 m de distance (voir figure 15). Le spectrogramme supérieur gauche provient d'un klaxon à 3 cornets monté sur la cabine d'une locomotive LRC, alors que l'inférieur gauche provient d'un klaxon de même type monté au milieu d'une locomotive F40, derrière l'échappement. La performance du klaxon F40 laisse à désirer à divers égards comparativement à celle du klaxon LRC. Les deux trains se déplacent à environ 90 mi/h. Comme le montre le décalage Doppler, la locomotive LRC ralentit à son approche du passage à niveau, alors que la F40 maintient sa vitesse et présente un décalage Doppler très rapide.

Sur le spectrogramme de la locomotive F40 (inférieur gauche à la figure 33), on peut voir que :

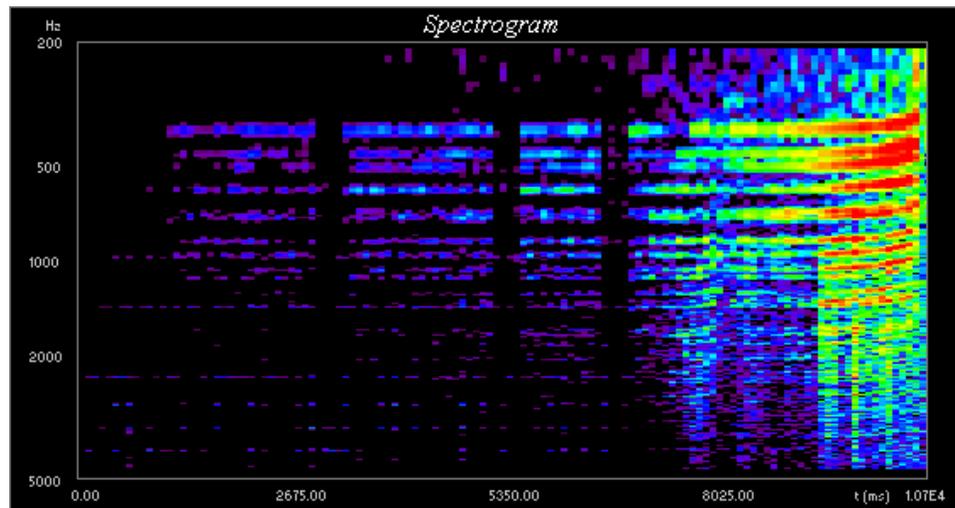
- le premier coup est à peine audible;
- le deuxième coup long n'est audible que par les piétons, de manière intermittente et étouffée, (même si le mécanicien de la locomotive actionne le klaxon en continu pendant tout l'intervalle de 2,5 s à 6 s);
- le signal ne serait pas perçu à l'intérieur d'une automobile silencieuse (couleur jaune) avant que le train ne se trouve à environ 1 s du passage à niveau.

On remarque que la locomotive Genesis, qui roule à 90 mi/h (spectrogramme supérieur droit), affiche une meilleure performance que la F40, mais qu'elle n'atteint pas celle de la LRC à la même vitesse, ni celle de la locomotive du train de marchandises qui se déplace à 63 mi/h (spectrogramme inférieur droit).

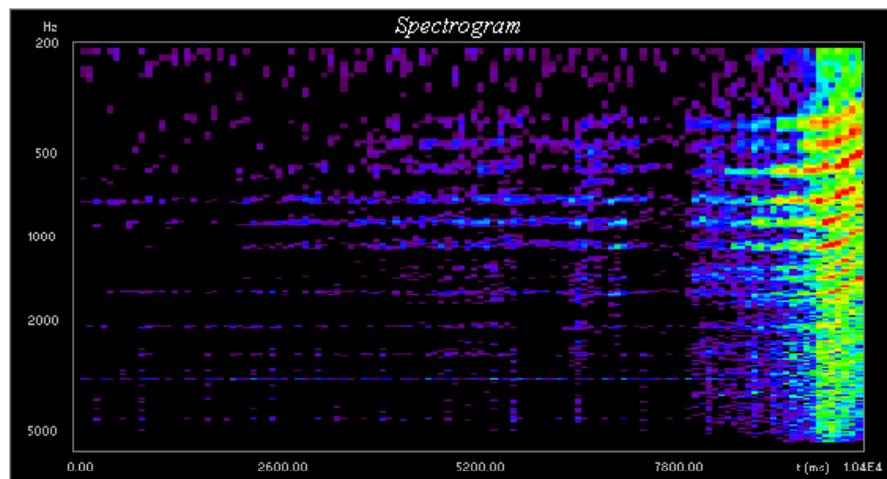
Le spectrogramme inférieur droit est celui d'une locomotive de train de marchandises se déplaçant à 63 mi/h. La performance est meilleure que dans le cas de la Genesis à 90 mi/h, mais inférieure à celle du klaxon monté sur la cabine de la LRC à 90 mi/h. Le niveau sonore augmente vers le milieu du deuxième coup de klaxon et atteint un niveau presque normal au troisième coup. Ce spectrogramme s'apparente au spectrogramme précédent (figure 18) d'une locomotive SD70 circulant à 40 mi/h.



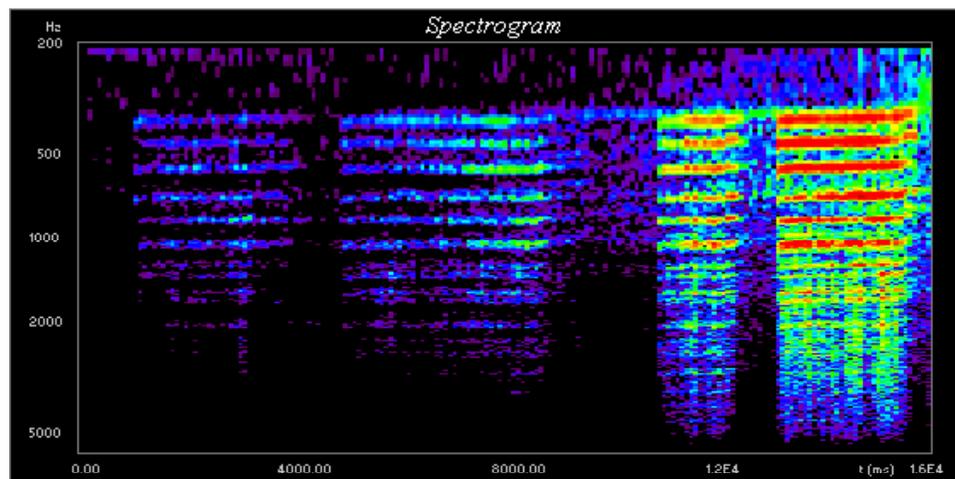
LRC, 3 cornets, sur la cabine, 90 mi/h



Genesis, 5 cornets, renforcement, 90 mi/h



3 cornets, derrière l'échappement, 92 mi/h



Marchandises, milieu de locomotive, 63 mi/h

Figure 33 Spectrogrammes enregistrés à 70 m du passage à niveau

Les spectrogrammes permettent de bien visualiser le spectre acoustique et d'évaluer de façon générale l'efficacité de l'avertissement sonore. Les critères S/B conviennent toutefois mieux pour évaluer les exigences et l'efficacité d'un dispositif d'avertissement sonore à l'intérieur des véhicules. C'est pourquoi on a plutôt recours à ces critères pour évaluer la situation de véhicules à l'approche d'un passage à niveau, au paragraphe 5.2.

5.2 Avertissement nécessaire pour conducteurs de véhicules

Deux cas de figure sont étudiés :

1. conducteur arrêté à un passage à niveau et évaluant s'il faut avancer ou non;
2. conducteur s'approchant d'un passage à niveau non automatisé.

Nous ne traitons pas à part les passages à niveau automatisés. Les dispositifs d'avertissement sonore embarqués y jouent en effet un rôle secondaire. Les passages à niveau automatisés sont habituellement associés à des débits de circulation plus importants, et sont bien souvent équipés de barrières ainsi que de feux clignotants et de sonneries. Il est également fort probable que les véhicules soient déjà arrêtés au passage à niveau avant que le train atteigne la distance d'avertissement critique.

Les exigences visant le klaxon sont plus rigoureuses aux passages à niveau non automatisés. En effet, le klaxon et les feux auxiliaires de la locomotive sont actuellement les seuls signaux avertissant un conducteur de l'arrivée d'un train. Donc, si l'intensité sonore du klaxon est efficace à un passage à niveau non automatisé, elle le sera d'autant plus à un passage à niveau automatisé.

Le reste de la présente section a été subdivisé en trois. En 5.2.1, il est question des conditions de bruit et des attitudes possibles chez les automobilistes, ainsi que du critère retenu en ce qui concerne l'avertissement sonore minimal que doit donner un klaxon de locomotive. L'efficacité de divers klaxons est ensuite évaluée pour les véhicules arrêtés à un passage à niveau (5.2.2) et pour ceux qui s'approchent d'un passage à niveau (5.2.3).

5.2.1 Avertissement nécessaire à l'intérieur des véhicules

Le critère d'avertissement sonore minimal retenu découle des faits et réflexions consignés au chapitre 3. Les niveaux recommandés dans les normes actuelles sur les dispositifs d'avertissement sonore ne conviennent pas pour les klaxons de locomotive. Nous avons noté que, selon Haas et coll. [1996], des SPL de 40 dBL permettent de donner l'alerte. Mais nos expériences ont indiqué que la perception de l'urgence associée à certains sons de 30 dB concorde avec les résultats mentionnés dans la littérature en ce qui concerne la sensibilité aux fréquences. Nous imposons donc un seuil d'alerte de 30 dB à l'intérieur des véhicules, tout en étant conscients que le critère S/B exige des niveaux sonores supérieurs à 40 dB dans la plupart des situations. Il faudrait faire comprendre à la population que les niveaux sonores de klaxons perçus dans l'habitacle d'un véhicule ne peuvent jamais avoir le même degré d'urgence que les signaux d'avertissement entendus en plein air. Compte tenu de la perte d'insertion de plus de 30 dB, la perception de l'intensité sonore correspond à environ 12 % de l'intensité du son perçue

à l'extérieur du véhicule. Notre critère d'avertissement en plein air (pour les piétons et les intrus) suppose un seuil de 47 dB, parce que les gens sont habitués à entendre très fort les klaxons de locomotives en plein air.

5.2.1.1 Conditions acoustiques à l'intérieur des véhicules

Les chercheurs du Volpe Center [Rapoza et coll., 1999] ont calculé les pertes d'insertion et les niveaux de bruit intérieur pour divers types d'automobiles circulant à 50 km/h (30 mi/h). Comme nous l'avons noté au chapitre 3, nous avons utilisé leur moyenne pour les sept automobiles de 1991 utilisées dans nos expériences sur la détection des signaux. Cette moyenne ne vaut que pour une seule vitesse et pour un habitacle silencieux – pas de ventilateur ou de radio qui fonctionnent.

Pour avoir une idée de la sensibilité à d'autres facteurs, nous avons mené une série d'essais avec un type de véhicule (une camionnette Ford Winstar 1998). La figure 34 présente les résultats en fonction du type de route, de la position de réglage du ventilateur et de la présence ou non de musique, pour le véhicule circulant à 60 km/h. La figure 35 montre l'importance de la position de réglage du ventilateur sur le bruit en comparant un véhicule immobilisé dont le ventilateur fonctionne à des véhicules en mouvement.

On peut voir à la figure 34 et à la figure 35 que c'est le bruit du ventilateur qui a la plus grande incidence sur tout le spectre du klaxon. La légende donne la vitesse, la position de réglage du ventilateur et celle de la radio dans chaque cas (p. ex., V60-F3-noR signifie une vitesse de 60 km/h, avec le ventilateur à la position 3 et la radio éteinte). Dans un véhicule immobilisé dont le ventilateur est réglé à une position élevée, le niveau sonore est à peu près le même, dans la plage de fréquences du klaxon, que dans un véhicule en mouvement. Au-delà de 2 kHz, le bruit est plus marqué dans le cas du véhicule immobilisé avec le ventilateur à la position 4 que dans celui du véhicule se déplaçant à 80 km/h avec le ventilateur à la position 3. Le revêtement routier en gravier a une incidence sur la plage des basses fréquences, mais peu d'impact au-dessus de 1 kHz. Passer de 60 km/h à 80 km/h a davantage d'influence sur la plage des fréquences sous 1 kHz que sur celle au-dessus de 1 kHz. La musique augmente toutes les bandes d'un tiers d'octave d'environ 2 dB et certaines (en l'occurrence celles de 630 Hz, 2 500 Hz et 5 000 Hz) de 5 dB. Les fréquences les plus touchées dépendent bien sûr du type de musique diffusée, mais tous les types de musique présentent une plus grande variation temporelle que les autres sources de bruit dans le véhicule. Le scénario où le bruit est le plus intense est celui dans lequel on fait fonctionner la climatisation à fond (avec deux ventilateurs en marche). Le SPL moyen, dans le cas du véhicule en mouvement, dépasse d'environ 10 dB la moyenne du Volpe Center, alors que dans le cas du véhicule immobilisé, dans lequel ni le ventilateur ni la radio ne fonctionnent, il est inférieur.

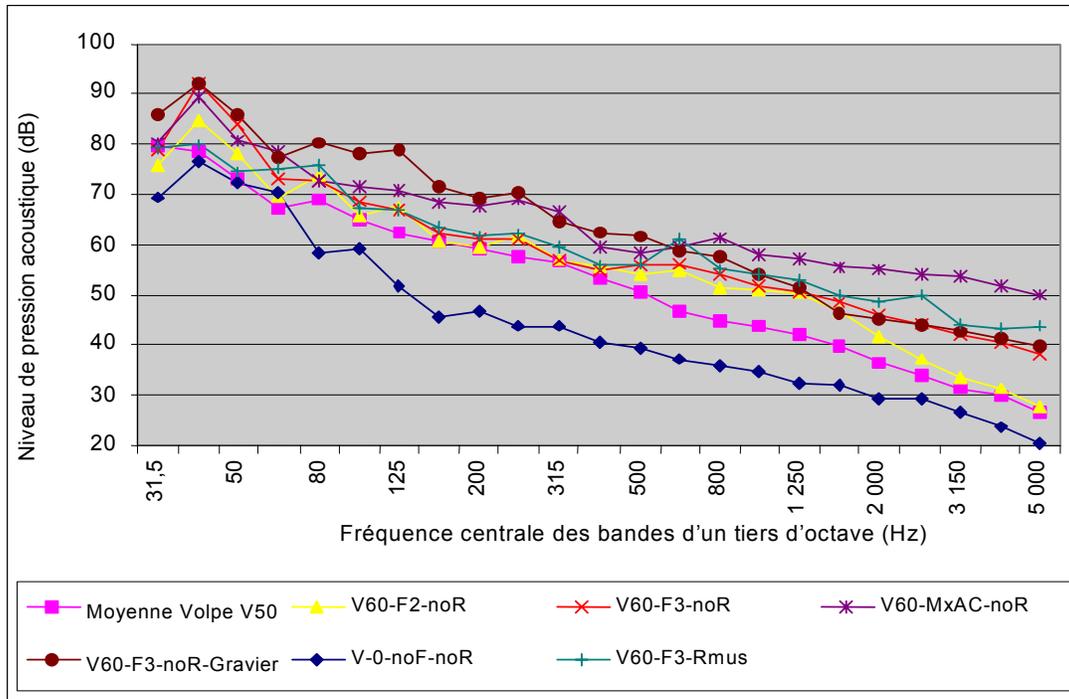


Figure 34 Sensibilité du bruit à l'intérieur d'un véhicule, à 60 km/h

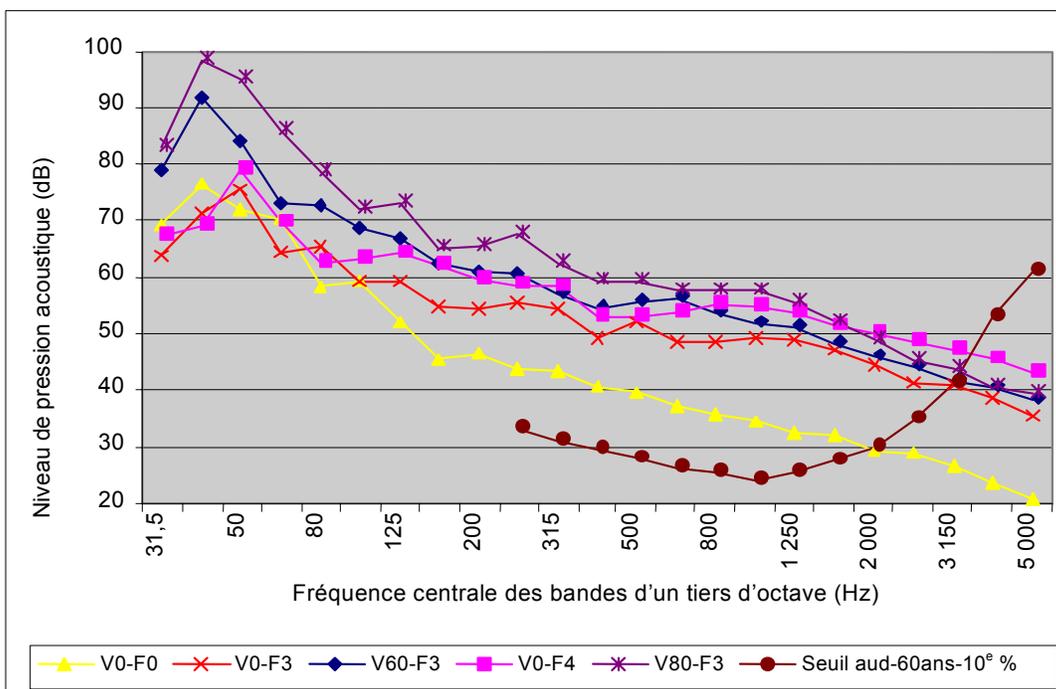


Figure 35 Sensibilité du bruit à l'intérieur d'un véhicule au bruit du ventilateur

Nous avons également évalué l'impact d'une perte auditive liée à l'âge sur la détection du signal à l'intérieur d'un véhicule. La figure 35 montre également le seuil d'audition d'un homme de 60 ans au 10^e percentile pour sa capacité auditive [ISO 7029, 1984] par rapport aux seuils de bruit masquant à l'intérieur d'un véhicule. On peut voir que la perte auditive liée à l'âge ne pose pas de problème particulier en ce qui concerne le spectre du klaxon et ne réduit pas vraiment l'importance du contenu en hautes fréquences. Le seuil d'audition de 42 dB à 3 150 Hz se trouve en deçà du niveau sonore associé à la position 3 du ventilateur. Notre seuil de 47 dB pour les situations d'alerte des piétons dépasse également le seuil d'audition pour toutes les fréquences jusqu'à 3 150 Hz. Nous faisons remarquer que les seuils d'audition des hommes de 70 ans au 25^e percentile et des femmes du même âge au 10^e percentile sont proches de celui des hommes de 60 ans au 10^e percentile, pour cette plage de fréquences. Les personnes ayant une perte auditive liée à l'âge au-delà de ces limites ne tireraient pas autant parti de l'enrichissement du contenu en hautes fréquences.

5.2.1.2 Critère d'alerte à l'intérieur du véhicule

La plage des niveaux de masquage possibles est large – celle de la figure 34 est supérieure à 20 dB sur une grande partie du spectre. Nous avons retenu comme «condition moyenne» le cas d'un véhicule se déplaçant à 60 km/h avec le ventilateur réglé à la position 2 (sur un maximum de 4). Pour un niveau de bruit donné, les seuils de réaction peuvent varier d'un individu à l'autre. Les trois scénarios choisis pour évaluation sont résumés au tableau 8.

Tableau 8 Hypothèses de scénarios d'alerte dans un véhicule à l'arrêt

Type de conducteur	Prudent	Attentif	Distrait
Bruit de fond	Ventilateur/radio éteints	Ventilateur réglé à 75 %	Ventilateur réglé à 75 %
S/M requis pour alerter	+ 9 dB	+ 9 dB	+ 18 dB

À noter que ces scénarios sont présentés à titre d'exemples et qu'il y en existe d'autres où les conditions sont plus ou moins exigeantes selon que les vitesses et/ou les niveaux sonores sont plus ou moins élevés. De plus, il y a différentes interprétations des niveaux d'alerte requis. Le rapport signal/masque de 9 dB se situe au seuil où, d'après les données expérimentales, les gens commencent à être alertés, alors que celui de 18 dB se trouve suffisamment au-delà du seuil d'alerte pour que la plupart des gens, mais pas tous, soient alertés. Notre critère tient compte de l'énergie totale dans toutes les bandes d'un tiers d'octave de la plage de fréquences du klaxon. Comme il a été mentionné à la section 3.1, certains chercheurs estiment que seule la détection suffit, alors que d'autres prétendent qu'il faut un rapport S/M de +9 dB dans une des bandes d'un tiers d'octave. Cette dernière hypothèse ajouterait environ 7 dB à notre critère. Par ailleurs, le seuil de détection du signal est inférieur à notre seuil de base pour alerter un conducteur attentif.

À noter que, pour les deux premiers niveaux, il faut compter sur le fait que le conducteur est à l'écoute d'un avertissement. Le premier niveau peut même exiger du conducteur qu'il prenne des mesures pour réduire le bruit (si le ventilateur ou la radio ne sont pas déjà éteints). Le troisième niveau suppose que l'attention du conducteur doit être détournée de ce qui le distrait.

D'après nos résultats, dans le cas de klaxons situés derrière une saillie faisant écran, la projection du son vers l'avant de la locomotive (surtout les composantes hautes fréquences) se détériore à mesure que la vitesse du train augmente. La projection latérale n'est toutefois pas atténuée. L'efficacité du klaxon est donc sensible à l'angle auquel l'auditeur se trouve. Pour illustrer ce facteur, nous avons porté sur des courbes polaires le SPL requis et les angles de klaxon connexes, pour une géométrie donnée de passage à niveau et différentes vitesses d'approche.

Notre critère de dissipation du son en fonction de la distance suppose ce qui suit :

- affaiblissements d'absorption sensibles à la fréquence associées à une température de 20 °C et une humidité relative de 60 %;
- pertes de dissipation (ou atténuation) de 6 dB/doublement de la distance, pour les avertissements le long de la voie;
- facteur de dissipation incrémentale de 0,55 % par degré d'angle par rapport à l'axe de la voie (p. ex., 25 % de dissipation à 45 degrés, ce qui donne une diminution de 7,5 dB/doublement de la distance), pour tenir compte des obstacles à la propagation du son.

Dans le cas des passages à niveau non automatisés, les exigences visant les dispositifs d'avertissement sonore sont les mêmes pour les conducteurs de véhicules que pour les piétons, à cela près qu'elles doivent aussi tenir compte des pertes d'insertion (caractéristiques de la transmission du son à travers la carrosserie) et des niveaux sonores à l'intérieur du véhicule. Rapoza et coll. [1999] ont calculé les pertes d'insertion et les niveaux sonores intérieurs pour toute une série de voitures particulières se déplaçant à 50 km/h (30 mi/h). Nous avons appliqué les moyennes aux sept véhicules modèle 1991 testés.

Les pertes d'insertion augmentent avec la fréquence du son. En effet, les sons basses fréquences ont tendance à pénétrer, alors que les signaux hautes fréquences sont plus facilement réfléchis. Il en résulte que le filtre *passé-bande* illustré précédemment pour l'alerte des piétons (figure 31) prend la forme d'un filtre *passé-bas* lorsque la perte d'insertion doit être prise en compte. Toutefois, le niveau de bruit de fond à l'intérieur d'une automobile penche fortement vers les basses fréquences. Lorsqu'on tient compte de ce facteur, le profil du filtre est plus plat et s'apparente même à celui d'un filtre *passé-haut*. Ces effets sont illustrés à la figure 36 pour un véhicule à une distance d'avertissement de 200 m.

Afin de mieux illustrer la contribution relative de la perte d'insertion et du masquage, on a normalisé les trois courbes de la figure 36 de manière à leur donner la même valeur à 1 kHz. La courbe à symboles carrés montre l'impact que représente le fait d'ajouter la perte d'insertion à l'affaiblissement d'absorption atmosphérique et au filtrage A illustrés pour le cas des piétons à la figure 31. On peut voir que la bande de 315 Hz est celle qui pénètre le plus facilement à l'intérieur d'un véhicule. Les deux autres courbes montrent l'incidence supplémentaire de l'effet masquant associé au bruit à l'intérieur d'un véhicule dont le moteur tourne au ralenti et le ventilateur est arrêté (V0, F0), et d'un véhicule se déplaçant à 60 km/h et dont le ventilateur est réglé à la position 3 (V60, F3).

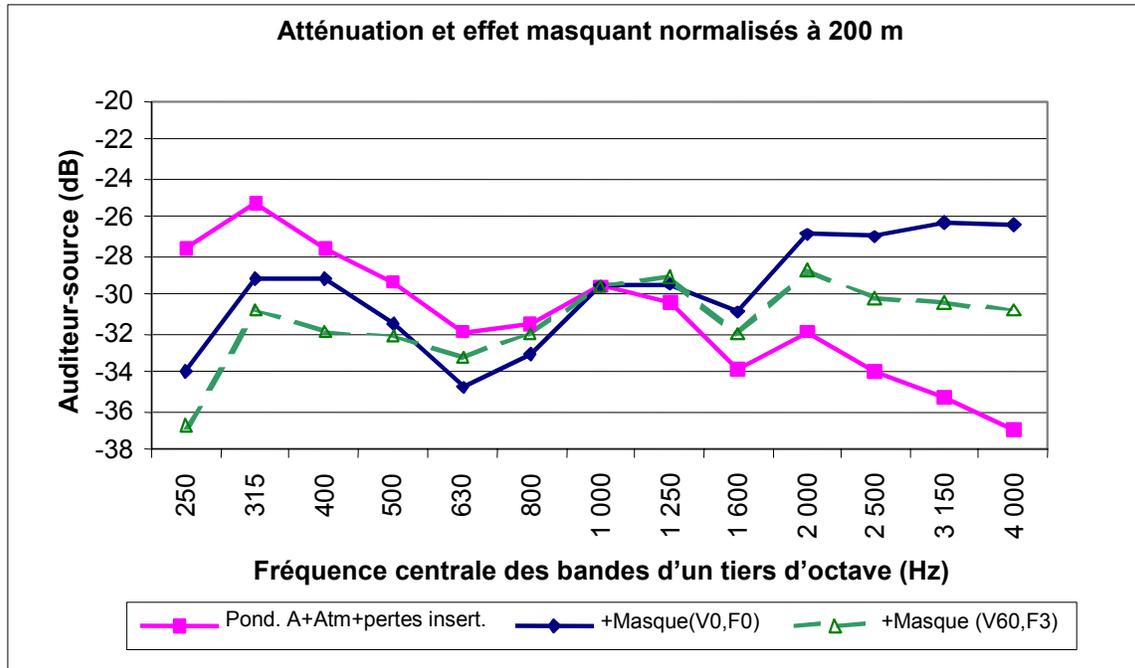


Figure 36 Filtre efficace du son du klaxon perçu par l'automobiliste

Le bruit masquant associé à une vitesse de déplacement de 60 km/h fait en sorte que la transmission des signaux de la source au cerveau est facilitée dans la bande de 1 à 4 kHz. Le bruit masquant plus marqué d'un véhicule au ralenti dont le ventilateur ne fonctionne pas accentue la bande de 2 à 4 kHz. À noter (voir la figure 35) que les hommes de 60 ans qui se situent au 10^e percentile de la population pour leur capacité auditive ne bénéficieraient pas de l'avantage que présente cette plage de fréquences pour un véhicule immobilisé et silencieux. La figure 37 compare les caractéristiques de fréquence de deux klaxons par rapport au critère de masquage pour un véhicule roulant à 60 km/h, dans lequel le ventilateur est réglé à la position 3. Comme on peut le voir, la courbe du klaxon à 5 cornets monté à l'avant a une forme qui lui permet de mieux tirer parti du SPL plus faible requis dans la gamme de 1 à 3,1 kHz, que le klaxon monté en milieu de locomotive. La remontée du seuil à 4 kHz reflète l'inclusion de la contrainte d'audibilité associée à un homme de 60 ans au 10^e percentile. Sans cette contrainte, les seuils de 4 000 Hz et de 5 000 Hz seraient également inférieurs aux caractéristiques du klaxon à 5 cornets monté à l'avant.

Parce que son spectre est plus large, le klaxon monté à l'avant peut atteindre un seuil de détection donné avec un niveau sonore plus faible que le klaxon placé au milieu de la locomotive. En effet, ce dernier doit produire un SPL de 5,3 dB plus élevé que le klaxon à 5 cornets monté à l'avant pour respecter le même critère S/B. Cela n'a rien à voir avec la puissance supplémentaire requise pour tenir compte de l'augmentation de la distance et des autres pertes dues à l'affaiblissement acoustique.

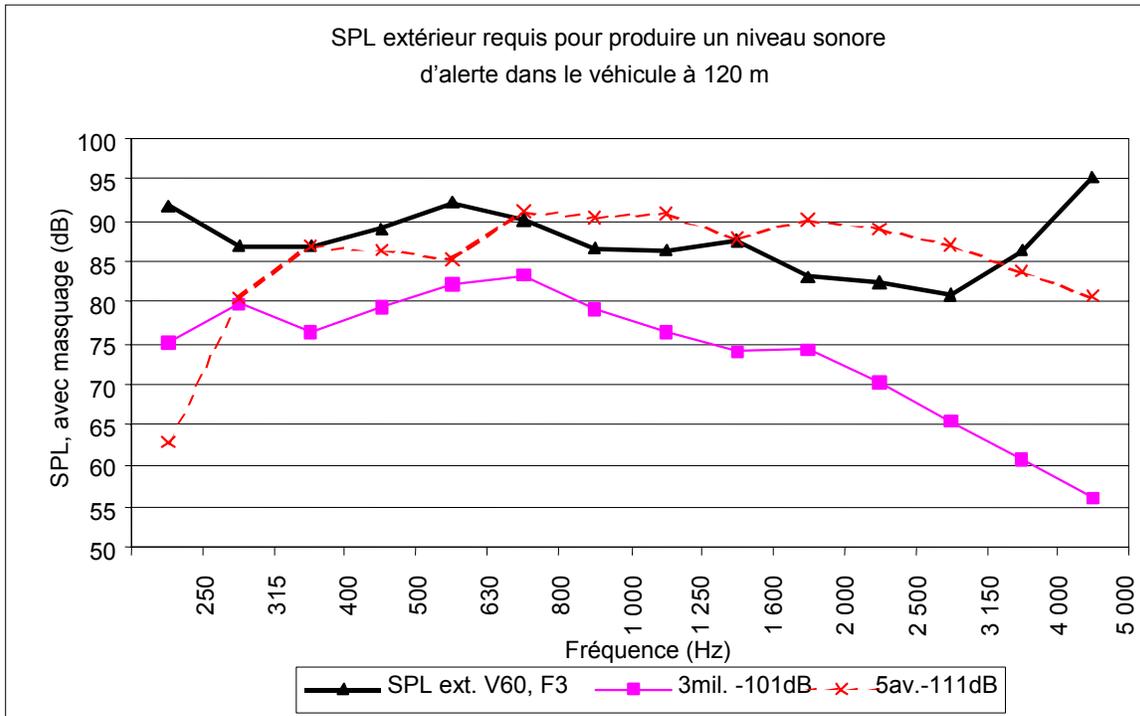


Figure 37 Comparaison des caractéristiques de deux klaxons par rapport à un seuil de niveau sonore

Nous avons confirmé les relations et effets masquants ci-dessus pour un véhicule dont le moteur tourne au ralenti, en prenant des mesures alors que le SPL dans l'habitacle était proche du seuil d'alerte. Le spectre de fréquences du signal perçu et les rapports S/B connexes sont présentés à la figure 38. Les barres représentent le SPL du signal du klaxon à l'intérieur du véhicule (échelle graduée sur l'axe de gauche), tandis que la ligne illustre le rapport S/B du klaxon (échelle graduée sur l'axe de droite). On peut voir que, même si le SPL est beaucoup plus faible dans la plage de 1,6 kHz à 3,2 kHz, le rapport S/B y est le plus élevé.

Il convient également de noter que le signal extérieur était de 78 dBA, mais qu'une grande partie de l'énergie était concentrée à 800 Hz, toujours avec une valeur S/B négative à l'intérieur du véhicule. Sans la composante 800 Hz, le SPL de la source aurait été de 76 dBA et aurait quand même été détecté.

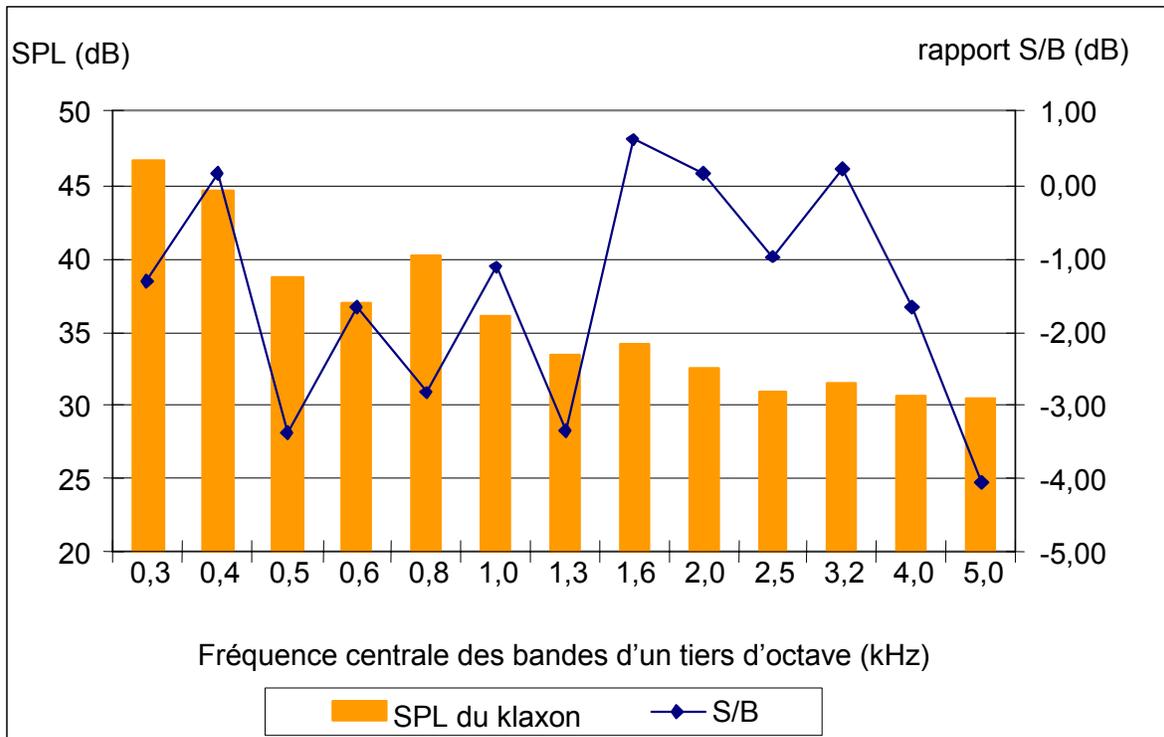


Figure 38 Niveau de pression acoustique à l'intérieur du véhicule et rapports S/B pour un klaxon audible

5.2.1.3 Conséquences pour les spectres de fréquences des klaxons de locomotives

La réglementation actuelle de Transports Canada stipule que le klaxon de locomotive doit *produire un son semblable à celui émis par un sifflet à vapeur*. Les sifflets à vapeur génèrent très peu d'harmoniques et ont des fréquences fondamentales inférieures à 500 Hz. Bien que le sifflet à vapeur puisse constituer un dispositif d'avertissement efficace en milieu ambiant calme, sa performance en présence de bruit de fond serait plus médiocre que celle de n'importe lequel des trois klaxons étudiés ici. Le remplacement des sifflets à vapeur (dont la fréquence de crête est de 400 Hz) par les klaxons pneumatiques actuels a entraîné une modification du son caractéristique des dispositifs d'avertissement sonore, rendant ceux-ci plus efficaces même s'ils ne sont pas conformes à la réglementation.

D'après la réglementation britannique,

[TRADUCTION]

Les sons émis par le dispositif d'avertissement sonore doivent pouvoir être reconnus comme étant ceux d'un train et ils ne doivent pas pouvoir être confondus avec ceux de dispositifs d'avertissement utilisés dans les transports routiers ou les usines, ou avec ceux provenant d'autres dispositifs d'avertissement courants.

Les spectres de fréquences des klaxons de locomotives actuels varient beaucoup. Tellement qu'il y a amplement de place pour approfondir certaines de leurs caractéristiques, sans s'occuper de quelque autre dispositif d'avertissement, du moins pour l'instant. Par ailleurs, une conséquence directe de cette grande variation est que la directive selon laquelle il faut «produire un son semblable à celui d'un train» est floue. Ce flou est exacerbé par la quasi-absence de règlements dans les autres secteurs. Ainsi, nous constatons que la norme SAE concernant les klaxons de camions prescrit simplement que la fréquence fondamentale doit être inscrite sur le klaxon.

La norme britannique donne des limites très précises quant aux sons acceptables, pour clarifier ce qu'il faut entendre par «produire un son semblable à celui d'un train». Elle n'accepte que deux types de klaxon, ayant chacun des fréquences particulières : un dispositif à 2 cornets émettant des sons distincts avec des fréquences fondamentales alternées de 311 Hz et 370 Hz, et un klaxon à 3 cornets émettant des sons simultanés avec des fréquences fondamentales de 370 Hz, 470 Hz et 622 Hz. La norme britannique va aussi jusqu'à restreindre le nombre de cornets et à préciser les fréquences fondamentales ainsi que l'ordre de grandeur relatif de tous les harmoniques jusqu'à 4 000 Hz.

À notre avis, ce niveau de détail est trop contraignant pour un règlement, mais il est souhaitable de caractériser l'amplitude du niveau sonore dans la gamme de fréquences des harmoniques. Il ressort de notre analyse que le spectre d'un klaxon monté à l'avant et sans écran est bien plus efficace que celui d'un klaxon monté au milieu de la locomotive. Nous pensons que les fabricants offrent actuellement une gamme adéquate de fréquences fondamentales. Sans que cela doive nécessairement être intégré à une norme, nous recommandons que les compagnies de chemin de fer et les constructeurs de locomotives rétrécissent leurs tolérances dans leurs spécifications d'achat. La norme britannique, qui accepte une variation de +/- 20 Hz par rapport à la fréquence fondamentale, paraît raisonnable. À noter qu'il faudrait une tolérance plus serrée dans les spécifications visant les klaxons de 470 Hz, 494 Hz et 512 Hz pour qu'ils constituent des options de rechange valables.

Comme nous l'avons dit plus haut, le contenu en harmoniques est un aspect plus important que la fréquence fondamentale. Un nouveau règlement sur les klaxons devrait prévoir un seuil pour les harmoniques. Elle imposerait aux compagnies de chemin de fer d'entretenir les klaxons de manière à toujours respecter le contenu en harmoniques supérieurs à 1 250 Hz. Elles seraient surtout tenues de placer le klaxon à un endroit tel que le passage des hautes fréquences ne serait pas entravé.

Les klaxons existants à 5 et 3 cornets peuvent respecter la recommandation ci-après s'ils sont montés à un endroit adéquat sur la locomotive. Il n'y a pas d'équivalent dans le projet de règlement de la FRA. Elle est moins précise que la pratique recommandée par le Royaume-Uni en ce qui concerne les fréquences fondamentales et plus exigeante en ce qui concerne le spectre harmonique.

- Les klaxons de locomotives doivent comporter des fréquences fondamentales compatibles avec au moins deux cornets et celles-ci doivent être comprises entre 250 Hz et 660 Hz.

- Le contenu en fréquences mesuré au cours d'essais statiques à 61 m doit être tel que le SPL minimal des bandes d'un tiers d'octave dans la gamme de 2 000 Hz à 3 150 Hz ne soit pas inférieur à Φ sous le SPL maximal des bandes d'un tiers d'octave dans la gamme de 250 Hz à 1 250 Hz (Φ étant égal à 12 dB dans le cas des trains dépassant les 70 mi/h, et à 15 dB, dans les autres cas).

Si la valeur idéale de 562 Hz établie par nos travaux en laboratoire est confirmée par un organisme indépendant, il faudrait modifier la première partie de la recommandation et préciser qu'au moins un cornet devrait avoir une fréquence fondamentale dans la gamme de 470 Hz à 512 Hz. La seconde partie de la recommandation pourrait stipuler que la compagnie de chemin de fer doit prescrire des essais acoustiques et qu'au moment de la remise à neuf de ses klaxons, le spectre de leurs cornets soit reprofilé, et non seulement leurs diaphragmes remis en état, comme c'est le cas actuellement.

5.2.2 Avertissement nécessaire pour un véhicule immobilisé à un passage à niveau et faisabilité

Transports Canada n'a pas encore mis à jour sa base de données sur les accidents aux passages à niveau. Nous avons obtenu quelques renseignements à ce sujet en consultant les statistiques de la FRA sur les accidents survenus aux passages à niveau pour 2000. D'après les statistiques, les accidents mettant en cause des véhicules qui s'arrêtent puis repartent se produisent beaucoup plus souvent aux passages à niveau automatisés (40 %) qu'à ceux qui ne le sont pas (26 %). Il y a aussi plus de véhicules abandonnés aux passages à niveau non automatisés. Plusieurs accidents à des passages à niveau automatisés mettent en présence des automobilistes qui ont fait un arrêt, puis décidés de repartir. En ce qui concerne les véhicules percutés par un train, la répartition de la vitesse est la même aux passages à niveau automatisés et non automatisés.

L'aspect le plus pertinent associé au klaxon pour les véhicules arrêtés à un passage à niveau est celui de son influence sur le jugement du conducteur concernant le temps dont il dispose pour traverser la voie. Pour que le conducteur puisse mieux juger du moment d'arrivée du train, il faudrait peut-être adopter la notion de délai d'avertissement fixe à partir du déclenchement du klaxon plutôt que celle de la distance fixe, utilisée actuellement. Il serait par ailleurs souhaitable que les trains rapides émettent un son plus intense de manière que l'avertissement, à 7 secondes de l'arrivée du train, soit le même, aux oreilles de l'automobiliste, qu'il provienne d'un train à 95 mi/h ou d'un train à 60 mi/h. Un train roulant à 95 mi/h devrait donc avoir un niveau sonore supérieur de 4,5 dB à celui d'un train se déplaçant à 60 mi/h afin d'assurer la même intensité pour un délai d'avertissement donné⁸. Si on adopte un niveau d'intensité sonore pour les trains grande vitesse, il serait logique qu'il soit supérieur de l'ordre de 4,5 dB à celui d'un klaxon de locomotive classique pour train de marchandises.

La situation qui se présente normalement à un passage à niveau non automatisé est celle d'un véhicule qui s'approche, mais on trouve aussi, aux passages à niveau équipés d'un panneau d'arrêt, des véhicules immobilisés et des véhicules, comme les autobus scolaires, qui sont tenus

⁸ En supposant une perte de 6 dB chaque fois que la distance est doublée et en tenant compte de l'incidence de la vitesse du son (332 m/s), l'intensité accrue requise à 95 mi/h (42,6 m/s) pour que l'auditeur perçoive la même intensité que celle d'un train à 60 mi/h (26,9 m/s) se calcule comme suit :
 $20 \text{ LOG}(42,6 / (1-42,6/332)) / (26,9 / (1-26,9/332))) = 4,45 \text{ dB}$.

de s'arrêter. Sur le plan du dispositif d'avertissement sonore, cela suppose que beaucoup de véhicules immobilisés ont un niveau de bruit de fond plus faible, que les conducteurs tendent l'oreille pour déterminer si un train arrive avant de prendre la décision de traverser le passage à niveau, et que l'angle de projection du son est quasi nul, ce qui élimine l'influence des obstacles le long de la voie. Les exigences visant le dispositif d'avertissement sonore peuvent ainsi être plus souples que pour les véhicules en mouvement.

Par ailleurs, les véhicules qui s'arrêtent aux passages à niveau parce qu'ils y sont tenus sont souvent des véhicules longs qui mettent plus de temps à dégager la voie une fois que le conducteur a décidé de traverser. Le calcul du délai d'avertissement pour un véhicule arrêté est semblable à celui indiqué à la section précédente pour les piétons. Le tableau 9 donne le SPL d'avertissement sonore minimal (ASM) requis pour avertir les trois types de conducteurs définis dans notre critère pour trois vitesses de train différentes. Chacune de ces combinaisons est reprise pour cinq temps de dégagement des véhicules et deux emplacements de klaxon. Ainsi, pour avertir un conducteur prudent (ventilateur/radio éteints et attentif) au volant d'un véhicule qui met 8 secondes à dégager le passage à niveau de l'arrivée d'une locomotive équipée d'un klaxon à 5 cornets à l'avant et se déplaçant à 90 mi/h, il faudrait un niveau d'intensité sonore de 108,5 dBA (équivalent à 100 pi).

Les cellules nécessitant une intensité supérieure à celle attendue du klaxon sont ombragées. Les cellules temps de dégagement de 12 secondes/vitesse de train de 90 mi/h visent des situations où il faut une distance supérieure à $\frac{1}{4}$ mille et où l'avertissement sonore ne convient pas. On peut voir que le klaxon à 5 cornets monté à l'avant est souvent plus efficace que celui placé en milieu de locomotive. Les cellules ombragées visant le klaxon monté en milieu de locomotive sont également basées sur la caractéristique de 101 dBA dérivée de mesures statiques. Si on considère la détérioration de l'intensité sonore avec la vitesse pour les klaxons montés en milieu de locomotive, comme on l'illustre en 4.4, seules les conditions prévues dans les cellules correspondant au *conducteur prudent*, aux faibles vitesses de train et aux temps de dégagement rapides sont respectées.

On constate également que les conducteurs des véhicules qui mettent plus de 8 secondes à dégager la voie seraient obligés de tendre l'oreille pour entendre arriver un train qui se déplace à 60 mi/h, même si ce train est équipé d'un klaxon à 5 cornets monté à l'avant. Il importe que ces conducteurs sachent qu'il n'est pas possible de les alerter à l'aide des dispositifs d'avertissement sonore actuels et qu'ils doivent donc prendre des mesures de prudence proactive aux passages à niveau. Les lignes de visibilité aux passages à niveau dépassent la zone d'avertissement de $\frac{1}{4}$ mille, et des mesures devraient être prises pour convaincre les conducteurs qu'il leur incombe de s'assurer visuellement qu'un train n'arrive pas.

Nous recommandons que Transports Canada insiste pour que les conducteurs de véhicules routiers soient sensibilisés à la nécessité d'abaisser les deux vitres et de couper toutes les sources de bruit de manière à pouvoir entendre un éventuel train s'approchant d'un passage à niveau, lorsque la visibilité est mauvaise. Il faudrait également aviser les autorités provinciales et municipales d'interdire aux autobus scolaires et aux ensembles tracteur-remorque de traverser les passages à niveau non automatisés sur les lignes de trains grande vitesse, en cas de faible visibilité (p. ex., brouillard, forte chute de neige). Nous préconisons que de telles mesures soient

prises notamment au passage à niveau de Mowbray Road, dans la subdivision de Kingston, en Ontario, qui n'est protégé que par un panneau d'arrêt, sur une ligne où les trains circulent à 100 mi/h.

Tableau 9 Avertissement (dBA à 100 pi) requis pour les véhicules arrêtés à un passage à niveau

Type de klaxon		K5-avant-111 dB			milieu locom. - 101 dB		
Vitesse du train (mi/h)		30	60	90	30	60	90
Temps de dégagement (s)	Type de conducteur						
4	Prudent	75,1	82,7	87,7	81,8	88,7	93,4
	Attentif	87,4	95,0	100,0	94,0	100,9	105,7
	Distrait	96,4	104,0	109,0	103,0	109,9	114,7
6	Prudent	79,2	87,2	92,5	85,5	92,9	98,0
	Attentif	91,5	99,4	104,8	97,7	105,2	110,3
	Distrait	100,5	108,4	113,8	106,7	114,2	119,3
8	Prudent	82,3	90,5	96,2	88,2	96,1	101,6
	Attentif	94,5	102,8	108,5	100,5	108,4	113,9
	Distrait	103,5	111,8	117,5	109,5	117,4	122,9
10	Prudent	84,7	93,2	99,3	90,5	98,8	104,7
	Attentif	96,9	105,5	111,5	102,8	111,0	116,9
	Distrait	105,9	114,5	120,5	111,8	120,0	125,9
12	Prudent	86,7	95,6	s.o.	92,4	101,0	s.o.
	Attentif	99,0	107,8	s.o.	104,7	113,3	s.o.
	Distrait	108,0	116,8	s.o.	113,7	122,3	s.o.

5.2.3 Avertissement requis pour un véhicule à l'approche d'un passage à niveau et faisabilité

5.2.3.1 *Distance d'avertissement nécessaire pour les véhicules à l'approche d'un passage à niveau*

Comparé à un véhicule routier immobilisé, un véhicule en mouvement non seulement affiche des caractéristiques sonores différentes dans l'habitacle, et il nécessite des calculs plus complexes pour l'établissement de la distance minimale d'avertissement à laquelle le conducteur doit entendre le klaxon d'une locomotive. Nous adoptons (à une différence près) la formule de distance minimale d'avertissement établie par Aurelius et Korobow [1971]. La distance entre le klaxon de la locomotive et le véhicule routier est une combinaison des distances minimales par rapport au passage à niveau auxquelles chacun d'eux doit se trouver pour que l'avertissement puisse être donné à temps. La distance critique pour le véhicule routier est une combinaison de la distance parcourue pendant le délai de réaction du conducteur (après avoir été alerté de la présence du train) et de la distance minimale de freinage selon sa vitesse et le frottement de la chaussée. Cette distance minimale d'avertissement (DMA) est donnée par la formule suivante :

$$DMA = \frac{V_a}{3,6T_{fr}} + \frac{V_a^2}{255(f \pm g)}$$

dans laquelle :

- V_a = vitesse du véhicule automobile (km/h)
- T_{fr} = temps de réaction en freinage du conducteur (s)
- g = gradient de l'approche routière
- f = coefficient de frottement pneu-sol hypothétique

Pour déterminer l'emplacement du train à ce point dans le temps, Aurelius et Korobow définissent un temps critique (T_{cr}). Il s'agit du temps requis pour permettre au véhicule routier de dégager la voie en toute sécurité avant l'arrivée du train, si le conducteur n'a pas entendu l'avertissement une microseconde avant que la DMA soit atteinte. On le définit par la formule suivante :

$$T_{cr} = (DMA + ZVC + L_v) / V_m$$

où :

- V_a = vitesse du véhicule automobile (m/s)
- ZVC = longueur de la zone de voie critique (m)
- L_v = longueur du véhicule automobile (m)

La distance du train par rapport au passage à niveau associée au T_{cr} est le produit de la vitesse du train et du T_{cr} . Pour les trains grande vitesse, la vitesse du son devient un facteur de retard pertinent. Aussi, nous écartant légèrement de la méthode d'Aurelius et Korobow, nous avons adopté une démarche itérative pour déterminer la distance d'avertissement de la part du train. D'abord, nous calculons la vitesse de propagation des ondes sonores du klaxon comme étant l'hypoténuse associée aux deux distances ci-dessus et à l'angle du passage à niveau. Nous corrigeons ensuite la distance du train en y ajoutant la distance associée au décalage entre le moment où le son sort du klaxon et celui où il arrive au véhicule.

Modifiant encore la méthode d'Aurelius et Korobow, nous évaluons les deux niveaux de performance suivants :

1. Les normes de conception routière généralement acceptées dans les calculs d'Aurelius et Korobow (un délai de réaction de 2,5 s et un coefficient de frottement d'environ 0,35).
2. Pour déterminer le point auquel un klaxon commence à être efficace, nous adoptons un critère d'efficacité moins strict, soit un délai de réaction de 0,6 s et un coefficient de frottement de 0,6.

Le premier niveau de performance reflète les normes de conception routière généralement acceptées en ce qui concerne le délai de réaction et le frottement correspondant au glissement de roues bloquées. Nous remarquons que, à l'instar de la plupart des critères de calcul de sécurité, les normes de conception routière essaient de prévoir toutes les conditions possibles. Mais un dispositif qui ne respecte pas les coefficients de calcul peut quand même être efficace dans certains cas. Ainsi, nous adoptons des valeurs plus faibles pour notre second niveau de réaction.

Il ne faut pas interpréter cela comme un argument pour assouplir les critères de calcul des lignes de visibilité, ou même pour réduire les distances d'avertissement sonore souhaitables. Ce niveau de réaction correspond simplement à des critères associés à la détectabilité initiale du klaxon dans une certaine proportion des situations pouvant se présenter aux passages à niveau. Le second niveau de performance reflète le frottement de roulement plus élevé associé aux systèmes de freinage antiblocage (ABS) sur chaussée sèche, et un délai de réaction plus court.

Le délai de réaction plus court est tiré de la documentation. Certaines études expérimentales font état de délais de 2,5 s; le délai moyen est toutefois généralement moins long. D'après Fidell [1978], qui a mené une étude expérimentale sur la réaction des automobilistes aux sirènes, le délai moyen (depuis le début du signal au niveau de détection jusqu'à l'actionnement des freins) est de 0,62 s.

Beauchemin-Beaton-LaPointe Inc. [1978] évoquent les travaux de Johansson et Rumar [1971], qui ont constaté des délais de réaction en freinage du même ordre pour des conducteurs qui s'attendaient à entendre un signal; les résultats médians étaient de 0,66 s, la plage allant de 0,3 s à 2 s. Ils ont également mené des essais de suivi avec deux groupes de conducteurs, le premier s'attendant à un signal et le deuxième n'ayant aucune attente. Les temps moyens sont passés de 0,54 s dans le cas du groupe prévenu à 0,73 s dans le cas celui qui ne l'était pas. Se fondant sur ces essais, Johansson et Rumar ont évalué le temps de réaction en freinage à 0,9 s ou plus pour 50 % des conducteurs, et à 1,5 s ou plus pour 10 % des conducteurs.

Najm et coll. [1995] ont dérivé une distribution log-normale des délais de réaction à partir d'expériences avec des conducteurs en situation simulée. La distribution se caractérise par une moyenne de 1,3 s, un mode de 1,07 s et une dispersion de 0,49 s. D'après Olson et Sivak [1986], les conducteurs en situation réelle mettent de 0,81 s à 1,76 s à réagir à des risques routiers inattendus.

Il est à noter que des délais de réaction plus longs ont aussi été recommandés. D'après Abrams et Lipscomb [1996], la perception ou le délai de réaction type pour les avertissements sonores et visuels est de 2,5 s. En ce qui concerne les signaux sonores, ils prévoient une seconde supplémentaire pour laisser à l'auditeur le temps de faire un balayage visuel et de localiser la source du signal d'alerte. Leur délai de réaction en freinage est donc de 3,5 s. Leur recommandation et la recherche documentaire mentionnée ci-dessus font ressortir le fait que les niveaux que nous avons retenus ne reflètent pas les limites extrêmes de la variation de performance attendue.

5.2.3.2 Conséquences pour l'avertissement sonore minimal

Nous avons modifié les trois scénarios d'avertissement sonore minimal appliqués au cas du véhicule immobilisé de manière à tenir compte des différences de temps de réaction dans le cas du véhicule en mouvement. Nous remplaçons le scénario du conducteur prudent (ventilateur et radio éteints) par celui du conducteur ayant une réaction rapide. Les trois scénarios sont résumés au tableau 10. Le scénario du milieu (Rapide ou attentif) présente deux combinaisons possibles. Car, comme la différence entre la réaction rapide et la réaction de base correspond à une différence d'avertissement sonore minimal d'environ 9 dB, la même situation peut être

interprétée comme étant celle d'un conducteur réagissant rapidement ou d'un conducteur ayant une réaction de base mais qui est attentif.

Tableau 10 Hypothèses concernant trois scénarios d'alerte pour des véhicules en mouvement

Scénario	Rapide et attentif	Rapide ou attentif		Distrait – réaction de base
Réaction (délai/frottement)	0,6 / 0,6	0,6 / 0,6	2,5 / 0,35	2,5 / 0,35
Bruit de fond	Ventilateur à 50 %	Ventilateur à 50 %		Ventilateur à 50 %
S/M Rapport requis pour alertes	+ 9 dB	+ 18 dB	+ 9 dB	+ 18 dB

Les exigences associées à l'avertissement sonore minimal du scénario du conducteur distrait ayant une réaction de base, au volant d'un véhicule roulant à 60 km/h sur une route revêtue en dur, avec le ventilateur intérieur réglé à la position 2 (sur une possibilité de 4) sont illustrées à la figure 39. Trois vitesses de train et cinq angles de passage à niveau sont illustrés. Les pointillés représentent un angle de passage à niveau⁹. Le niveau sonore le plus élevé et l'angle de klaxon le plus faible sont associés à la vitesse de train la plus grande, soit 145 km/h (90 mi/h), et à un angle de passage à niveau de 150 degrés (véhicule routier s'approchant du train). Suivant un ordre descendant de niveaux sonores, les autres points de données représentent l'avertissement sonore minimal pour des angles de passage à niveau de 120 degrés, 90 degrés, 60 degrés et 30 degrés. À noter que les points de données sont fondés sur les caractéristiques sonores à large spectre des klaxons montés à l'avant.

Dans le cas des klaxons montés en milieu de locomotive, il faut prévoir 5,2 dB de plus (comme on l'explique au paragraphe 5.2.1). Il est évident que, pour tous les angles de passage à niveau, plus le train est rapide, plus il importe que l'avertissement soit focalisé en avant du train. Il est également évident que, dans le cas de trains se déplaçant à 90 mi/h, certains angles dépassent les limites du dispositif d'avertissement sonore, compte tenu de l'avertissement minimal associé à ce scénario. Le diagramme est toutefois basé sur le scénario le plus prudent des trois. Il est question des autres ci-après.

⁹ Aux fins du calcul du niveau sonore requis du klaxon, les angles du passage à niveau ont été mesurés en admettant un angle nul lorsque la route est alignée avec la voie et que les circulations ferroviaire et routière se font dans le même sens.

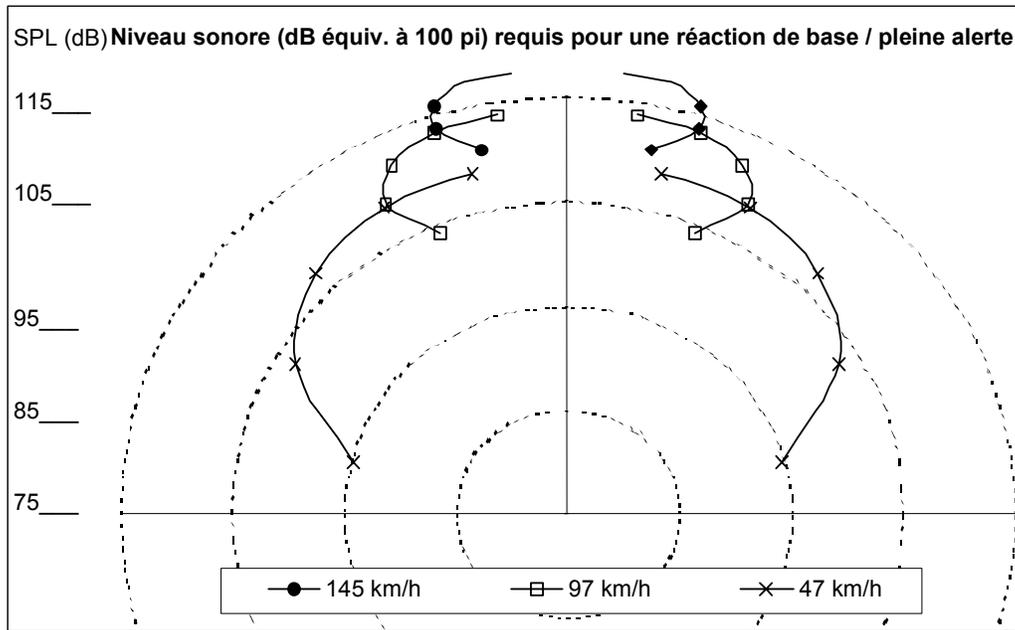


Figure 39 Niveau sonore requis pour des vitesses et des angles de passage à niveau donnés

5.2.3.3 Comparaison des besoins et de la faisabilité

La figure 40 illustre la sensibilité du niveau d'avertissement sonore minimal au scénario d'avertissement sélectionné pour un train circulant 90 mi/h (145 km/h). Dans le scénario du conducteur rapide ou attentif, le niveau ASM tombe dans une gamme réalisable. Toutefois, en raison de la limite réglementaire actuelle de 96 dB, il faut que le conducteur réagisse rapidement et soit attentif pour que le klaxon à large spectre soit efficace à des angles faibles de passage à niveau, lorsque le train se déplace à 90 mi/h. Alors qu'un klaxon à large spectre émettant un signal de 96 dB permet d'obtenir l'ASM requis pour un conducteur attentif et réagissant rapidement, il faut prévoir 5 dB de plus pour un klaxon à spectre étroit. Ce dernier ne convient donc pas pour les scénarios présentés à la figure 40. Comme il est indiqué au paragraphe 4.4.1, l'intensité d'un klaxon placé en milieu de locomotive varie considérablement en fonction de l'angle polaire.

La figure 40 montre le niveau sonore du signal émis par le klaxon d'une locomotive F40 lorsque celle-ci se déplace à 145 km/h (90 mi/h), et le véhicule routier à 60 km/h. On peut constater que le niveau sonore du klaxon ne permet pas d'avertir les véhicules s'approchant du passage à niveau, et ce même dans le scénario le plus optimiste. Si le niveau sonore projeté latéralement pouvait aussi être projeté vers l'avant de la locomotive, deux des scénarios, de même qu'un angle de passage à niveau du scénario «réaction de base» seraient respectés.

Nous avons concentré notre analyse sur des vitesses routières de 60 km/h pour deux raisons. D'abord, elles couvrent beaucoup des situations aux passages à niveau urbains et un grand nombre des situations aux passages à niveau non automatisés, en région rurale. Ensuite, elles se situent aux limites de faisabilité pour un dispositif d'avertissement sonore installé sur un train

grande vitesse. On peut en effet constater que les exigences associées au scénario du conducteur distrait et ayant une réaction de base débordent de la plage de faisabilité, aux vitesses combinées de 90 mi/h pour le train et de 60 km/h pour le véhicule routier. Nous n'avons pas évalué de scénario de vitesse routière de 80 km/h, parce que peu de ces scénarios confirmaient la faisabilité d'un dispositif d'avertissement sonore à cette vitesse.

Les klaxons de locomotives ne peuvent pas être considérés comme des dispositifs d'avertissement efficaces aux passages à niveau où les vitesses ferroviaires et routières sont élevées. Il faut plutôt se fier aux avertissements visuels pour nombre de combinaisons vitesse/angle. Il est à noter que les angles de traversée qui placent le véhicule routier le plus loin du train sont aussi ceux qui permettent le mieux de voir arriver le train. Les angles les plus aigus, où le conducteur devrait regarder vers l'arrière pour voir le train, sont ceux qui donnent les distances d'avertissement sonore les plus faibles. Toutefois, à haute vitesse (ferroviaire et routière), même l'approche à angle aigu ne tombe pas dans la plage de faisabilité d'un dispositif d'avertissement sonore.

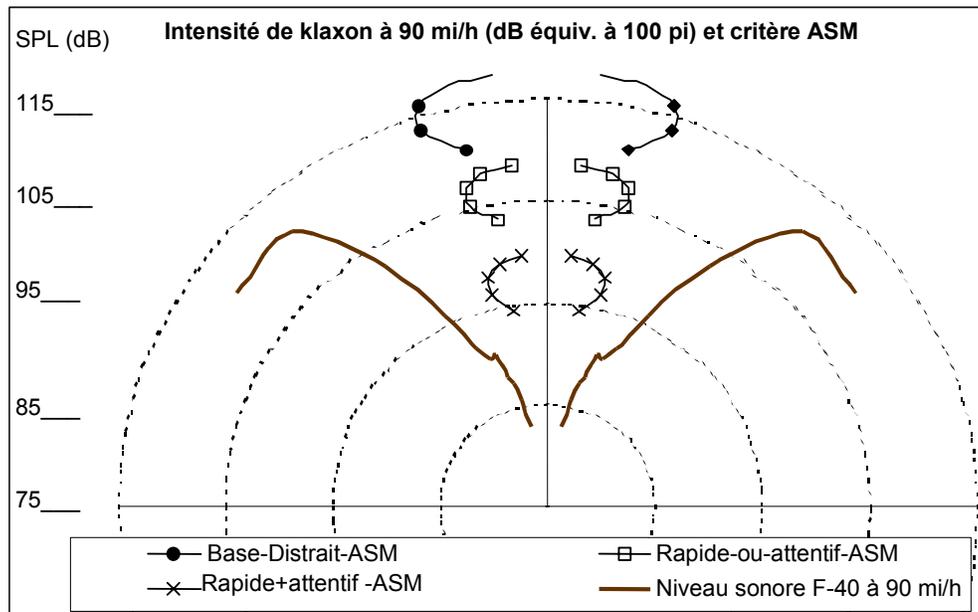


Figure 40 Niveau sonore produit par un klaxon de locomotive F40 à 90 mi/h vs niveau requis

Le «pire cas» dans le corridor haute vitesse de VIA Rail est un passage à niveau non automatisé où la vitesse routière est limitée à 80 km/h, la vitesse de train est de 153 km/h (95 mi/h) et l'angle de traversée est de 45 /135 . Pour ces combinaisons de vitesses, il est impossible d'alerter un conducteur distrait, quel que soit l'angle. Il sera possible d'alerter le conducteur attentif ou ayant une réaction rapide s'il se trouve dans un véhicule silencieux et si son angle d'approche est de 90 degrés ou moins.

Les résultats montrent les avantages que présente une composante d'alerte visuelle aux passages à niveau non automatisés (voir annexe B). Une autre solution consiste à réduire la vitesse routière à ces endroits. Étant donné les limites des dispositifs d'avertissement sonore, il importe que les vitesses aux approches d'un passage à niveau soient compatibles avec l'état de la route. La limite de vitesse aux passages à niveau où la chaussée est de gravier ne devrait pas dépasser 60 km/h. Tous les passages à niveau non automatisés devraient être équipés de panneaux d'avertissement indiquant de réduire la vitesse sur chaussée humide et par mauvaise visibilité.

La figure 41 compare le niveau sonore mesuré de divers klaxons de locomotives de trains de marchandises aux niveaux exigés par les trois scénarios ASM, pour une vitesse routière de 60 km/h et une vitesse de train de 97 km/h (60 mi/h). On trouvera à l'annexe E des photos de chacune des locomotives avec l'emplacement des klaxons. La légende donne la vitesse à laquelle le SPL de la locomotive a été mesuré : celui-ci est supposé représentatif du scénario de l'ASM pour une vitesse de train de 97 km/h (60 mi/h) auquel il est comparé. On peut voir que la locomotive GP9 (avec le klaxon juste derrière l'échappement) ne respecte que les exigences du scénario du conducteur attentif et réagissant rapidement, pour deux angles de passage à niveau. La locomotive SD-40 (klaxon placé du côté gauche de la locomotive) répond aux exigences d'un bon nombre de combinaisons scénario/angle de passage à niveau du côté gauche de la locomotive, mais elle répond moins bien du côté droit. La locomotive Dash-9 (klaxon placé plus loin derrière les parois-écrans et devant l'échappement) respecte les exigences de tous les scénarios pour des angles de passage à niveau de 90 degrés ou moins.

La figure 42 compare les exigences d'ASM pour une vitesse de train de 47 km/h (30 mi/h). On peut également voir la courbe polaire du niveau sonore (dB équivalent à 100 pi) émis par deux klaxons de locomotives dans cette gamme de vitesses – une locomotive F59 de train de voyageurs et une locomotive Dash-9 de train de marchandises. À ces vitesses, l'atténuation du son vers l'avant de la locomotive n'influe pas beaucoup sur l'avertissement nécessaire aux conducteurs qui s'approchent du passage à niveau.

5.3 Conséquences pour le niveau sonore

La réglementation de la FRA concernant les dispositifs d'avertissement sonore stipule que toute locomotive doit être équipée d'un dispositif d'avertissement sonore produisant un niveau sonore minimal de 96 dBA à 100 pieds en avant de la locomotive dans le sens de son déplacement (paragraphe 229.129a dans 49 CFR Partie 229). Les chemins de fer canadiens dépassent généralement cette exigence.

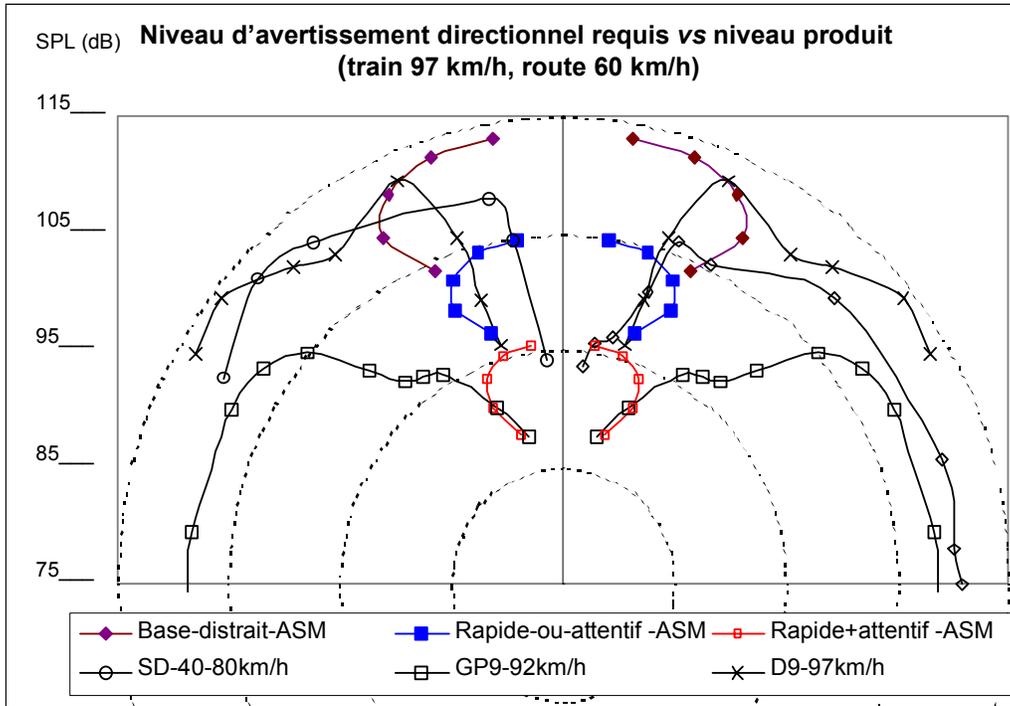


Figure 41 Intensité du klaxon nécessaire à 97 km/h

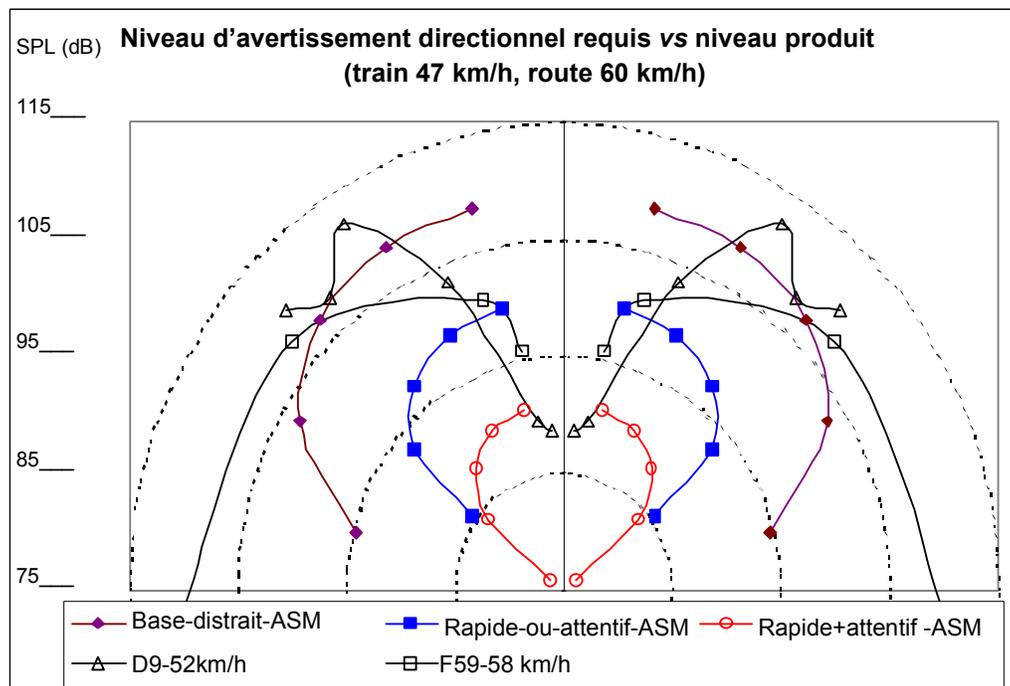


Figure 42 Intensité du klaxon nécessaire à 47 km/h

Le projet de nouvelle règle étudié par la FRA [Federal Register, 2000] maintient ce minimum mais supprime la marge d'erreur autorisée précédemment dans les mesures d'essai du niveau sonore. La nouvelle règle introduit pour la première fois la notion de niveau sonore maximal admissible.

Dans ses discussions concernant cette nouvelle règle, la FRA examine le bien-fondé d'adopter deux limites supérieures de fonctionnement :

1. une limite de 104 dBA qui pourrait être associée à un fonctionnement nocturne ou aux passages à niveau automatisés,
2. une autre plus élevée, de 111 dBA, qui pourrait être associée à un fonctionnement diurne ou aux passages à niveau non automatisés.

Cela veut dire que le klaxon serait utilisé dans deux plages de fonctionnement : de 96 dBA à 104 dBA dans certaines conditions, et de 104 dBA à 111 dBA dans d'autres.

La réglementation britannique préconise également un klaxon à deux niveaux sonores et prescrit un niveau sonore maximal. Le double niveau sonore ne s'applique qu'aux vitesses supérieures à 160 km/h (100 mi/h), et les limites de maximum sont mesurées seulement à 5 m devant la locomotive. La réglementation britannique concernant l'intensité sonore est résumée au tableau 11. Une limite minimale est prescrite à 5 m et à 100 m. La dernière colonne du tableau donne notre calcul de l'équivalent à 30,5 m sur la base de -6 dB/doublement de la distance (équivalent à la relation 5 m / 100 m de la réglementation britannique).

Tableau 11 Norme britannique visant l'intensité sonore des klaxons

Distance en avant du véhicule	5 mètres		100 mètres	30,5 mètres (notre équivalent calculé)	
	Minimum (dBC)	Maximum (dBC)	Minimum (dBC)	Minimum (dBC)	Maximum (dBC)
Trains ≤ 160 km/h	120	125	94	104	109
Trains à plus de 160 km/h					
mode «fort»	122	128	96	106	112
mode «doux»	115	119	89	99	103

Source (4 colonnes de gauche seulement) : U.K. Railway Group, 1995

La réglementation britannique vaut pour une pondération en C. Cette pondération est régulière sur tout le spectre du klaxon; contrairement à la pondération en A, elle ne réduit pas la contribution des basses fréquences et n'augmente pas celle des fréquences moyennes. Toutefois, comme le spectre du klaxon comprend ces deux régions, nous avons constaté que les valeurs positives et négatives s'annulaient lors de la sommation, et que les SPL sont très proches dans l'une et l'autre échelle.

Queensland Railways, en Australie, utilise aussi des klaxons à deux niveaux sonores-niveau élevé pour les régions rurales et niveau faible pour les régions urbaines [Queensland Railways, 1997]. Cette compagnie utilise un klaxon à 5 cornets à fréquences basses (K5LL), celui-là même qu'a adopté Long Island Railroad (LIRR) (voir paragraphe 6.2.2). Ses normes (tableau 12), une

fois adaptées aux 30,5 m, préconisent un niveau sonore de 95 dBA à 100 dBA en zone urbaine et de 101 dBA à 111 dBA en région rurale. Il importe de noter que la norme australienne limite également les niveaux sonores dans la cabine à 85 dBA lorsque les fenêtres sont fermées et à 90 dBA lorsqu'elles sont ouvertes.

La disposition du projet de nouvelle règle de la FRA qui est susceptible d'avoir le plus d'impact et qui a suscité le plus de réaction dans le public est la levée de l'abolition du sifflement des trains (sauf en vertu de critères stricts). D'après la FRA, l'établissement d'une limite maximale de 111 dBA plutôt que de 115 dBA permettrait de réduire d'environ 15 % la gêne due au bruit dans les collectivités riveraines. Par ailleurs, Transports Canada ne propose pas de lever les abolitions du sifflement et a déjà une réglementation limitant le niveau sonore dans la cabine. Limiter spécifiquement le niveau d'avertissement en avant de la locomotive va à l'encontre des résultats de notre analyse. Si on déplace, par exemple, le klaxon du milieu de la locomotive vers l'avant de celle-ci, le klaxon serait trop bruyant selon la nouvelle limite maximale de 104 dBA établie par la FRA, mais cela n'augmenterait pas le niveau de nuisance sonore pour les collectivités riveraines dans les zones où le sifflement n'est pas interdit.

Tableau 12 Normes australiennes (Queensland) visant l'intensité sonore des klaxons

Distance en avant du véhicule	200 m		100 m		Notre équivalent calculé à 30,5 m	
	Minimum (dBA)	Maximum (dBA)	Minimum (dBA)	Maximum (dBA)	Minimum (dBA)	Maximum (dBA)
mode «fort»	85	95	s.o.	s.o.	101	111
mode «doux»	s.o.	s.o.	85	90	95	100

Des limites de niveau sonore maximal sont souhaitables tant du point de vue des piétons que de celui des collectivités riveraines. Nous recommandons de définir ces limites seulement pour un angle de 90 degrés par rapport à la locomotive plutôt que vers l'avant de celle-ci. La réglementation britannique [U.K. Railway Group, 1995] stipule une limite maximale de 135 dB le long de la voie, mesurée au passage d'un train se déplaçant à 10 km/h, à 1,5 m au-dessus de la partie supérieure du rail et à 1,2 et 2,0 m, dans le plan horizontal, du rail le plus proche. Les klaxons de locomotives britanniques sont montés près de l'attelage plutôt que sur le toit. Nous recommandons que la limite de 135 dB soit mesurée à une hauteur de 1,5 m au-dessus du quai réservé aux voyageurs plutôt qu'à partir du sommet du rail.

D'après nos constatations, la norme actuelle de 96 dBA à 30,5 m oblige le conducteur de véhicule automobile à prendre des mesures de réduction du bruit et à être très attentif à un son de klaxon. Nous n'avons pas trouvé, dans la documentation, de mesures de signaux de klaxons inférieures à 101 dBA et nos propres mesures ne nous ont pas donné de valeur inférieure à 108 dB, à un angle latéral par rapport à la locomotive. Presque tous les klaxons à 3 et à 5 cornets tombaient dans la plage de 108 dB à 110 dB et atteignaient 115 dB dans certains cas. Les klaxons montés en milieu de locomotive affichaient 101 dBA aux essais statiques. Il ne nous semble pas indiqué de fixer une limite inférieure à 96 dBA. Nous recommandons que les équipes de conduite de toutes les locomotives pouvant atteindre des vitesses supérieures à 65 mi/h disposent d'un klaxon monté à l'avant et capable de produire un SPL d'au moins 110 dBA

à 100 pi. Si les règles d'exploitation ferroviaire réservent l'usage de ce klaxon aux seuls cas d'urgence, il faudrait alors que le klaxon normal soit placé à un endroit tel qu'il produise au moins 100 dB à pleine vitesse, à des angles de 25 degrés et plus par rapport à l'avant. Lorsque des klaxons à deux niveaux sonores sont utilisés, nous recommandons que le niveau le plus faible ait une intensité d'au moins 100 dB.

D'après notre analyse, il est possible de réduire la gêne pour les collectivités riveraines en raccourcissant la durée de l'avertissement sans pour autant réduire de beaucoup son efficacité. Nous recommandons de diminuer la durée de l'avertissement avant d'envisager d'établir comme règles universelles des limites d'intensité sonore pour les klaxons. L'avertissement provenant d'un klaxon distant de 400 m entendu à l'intérieur d'un véhicule se trouve à la limite du seuil de détection pour un véhicule silencieux. S'il pouvait être entendu, un délai d'avertissement de 30 secondes, dans le cas d'un train se déplaçant à 30 mi/h, pourrait entraîner un comportement à risque chez les personnes qui, lorsqu'elles entendent le sifflet, croient qu'elles ont jusqu'à 30 secondes pour *passer avant le train*. Nous recommandons que les chemins de fer modifient leur règle d'exploitation 14(L)(ii) de manière à accorder aux mécaniciens une plus grande flexibilité dans la façon d'utiliser les klaxons aux passages à niveau où le klaxon est obligatoire. Aussi, il faudrait les encourager à donner le premier coup de klaxon à un endroit qu'ils jugent se trouver à 15 s du passage à niveau, ou au poteau commandant de siffler actuel, si leur vitesse excède 60 mi/h. Aux passages à niveau où il y a une limite permanente de vitesse en voie de 40 mi/h ou moins, le poteau commandant de siffler devrait se trouver à une distance permettant un délai d'avertissement de 15 s au premier coup de klaxon émis par un train se déplaçant à la limite de vitesse. De la même façon, l'efficacité à l'autre extrémité du sifflet a une efficacité limitée. Nous recommandons également que les mécaniciens de locomotive aient la possibilité d'arrêter le klaxon à l'entrée (plutôt qu'à la sortie) d'un passage à niveau protégé par des barrières, lorsqu'il y a déjà plusieurs véhicules arrêtés.

Avoir deux niveaux d'intensité sonore présente des avantages. Le son le plus intense serait essentiellement utilisé en cas d'urgence perçue par le mécanicien de la locomotive. Il peut aussi être souhaitable d'envisager les utilisations de jour/de nuit, en région urbaine/rurale et à faible/haute vitesse que l'on retrouve dans les autres réglementations dont il a été question précédemment. Comme nous l'avons déjà mentionné, une augmentation d'intensité de 4,5 dB garantirait le même niveau d'avertissement, à un passage à niveau, d'un train roulant à 95 mi/h et d'un train circulant à 60 mi/h, avec un délai d'avertissement équivalent. Si un train de voyageurs dont la vitesse dépasse 65 mi/h est équipé d'un klaxon à 5 cornets monté à l'avant et pouvant produire de 111 dBA à 115 dBA en cas d'urgence perçue, il conviendrait peut-être d'envisager un niveau d'intensité de 107 dBA à 111 dBA à 30,5 m (100 pi) pour les trains de marchandises.

Nous encourageons les compagnies de chemins de fer canadiennes à demander à la FRA de réviser sa limite concernant le niveau sonore haut des klaxons à deux niveaux pour les locomotives qui ne sont pas normalement exploitées aux États-Unis. Bien que la conciliation des intérêts des collectivités riveraines et des impératifs de sécurité puisse justifier cette règle après la levée de l'abolition du sifflement des trains, le but à l'origine de ces klaxons à deux niveaux sonores est de réduire l'usage du niveau élevé. Il semble illogique de limiter le niveau haut à 111 dB puisque même 115 dB ne sont pas suffisants dans nombre de scénarios d'alerte. Nous verrions plutôt la limite du niveau haut fixée à 115 dB. Si la FRA maintient la limite de 111 dB

dans sa règle définitive, nous recommandons que Transports Canada tente d'obtenir une dérogation pour les locomotives canadiennes, notamment les locomotives grande vitesse de VIA Rail qui traversent la frontière.

Les données sur les accidents apportent un appui supplémentaire à ce point de vue. Nous avons consulté la base de données de la FRA sur les accidents survenus aux passages à niveau en 2000 pour avoir une idée de la vitesse des automobiles percutées par un train à un passage à niveau. Aux passages à niveau non automatisés, 65 % des automobiles roulaient à 10 mi/h ou moins. Cela pourrait signifier que 65 % des conducteurs ont été avertis de la présence du train à temps pour freiner mais qu'ils n'ont pas eu assez de temps pour ralentir suffisamment et s'arrêter avant la voie. Certains de ces automobilistes peuvent ne pas avoir entendu le klaxon de la locomotive, mais avoir été alertés visuellement. Il ressort toutefois des études de la FRA sur l'abolition du sifflement des trains qu'au moins certains de ces conducteurs ont été alertés par le klaxon. Une légère augmentation de la capacité d'alerte de ces klaxons aurait une incidence sur ces automobilistes. Pour en revenir aux distances d'arrêt de sécurité (paragraphe 5.2.3.1), la distance d'avertissement supplémentaire requise pour que ces conducteurs s'arrêtent en toute sécurité peut être estimée de la manière suivante :

- 10 m pour éviter la voie;
- 8 m pour tenir compte de la longueur du véhicule;
- 3,5 m comme distance d'arrêt supplémentaire ($V^2 / [2 \times 0.35g]$, où $V = 5,4$ m/s (10 mi/h)).

Pour une vitesse routière de 60 km/h, la distance supplémentaire, selon la vitesse de réaction, est comprise entre 26 % et 56 % de la *distance d'avertissement minimale*. Dans le cas des conducteurs qui ont été alertés d'abord par le klaxon, un klaxon ayant une intensité sonore de 2,5 dB de plus aurait permis d'accorder la distance supplémentaire nécessaire à ceux qui ont une réaction de base (5 dB dans le cas de ceux ayant une réaction rapide).

5.4 Conséquences pour l'emplacement du klaxon

Nos résultats révèlent un lien entre la vitesse et l'atténuation du niveau sonore produit par les klaxons placés en milieu de locomotive. Cette atténuation est maximale en avant de la locomotive et elle diminue avec l'accroissement de l'angle latéral par rapport à l'avant. C'est lorsque le klaxon est situé juste derrière le capot d'échappement que l'aire d'atténuation est la plus étendue, tandis que les vitesses supérieures à 65 mi/h accentuent l'importance de l'atténuation. De plus, les hautes fréquences sont davantage atténuées que les basses fréquences, ce qui réduit la détectabilité du klaxon à l'intérieur d'un véhicule, de même que ses qualités d'alerte. Le son émis par les klaxons placés juste derrière l'échappement est également moins clair et pourrait être perçu comme provenant d'une source éloignée.

À notre avis, toutes les nouvelles locomotives devraient être construites avec un klaxon monté à l'avant. En raison de l'effet du sol et de l'effet d'écran associé aux aménagements et aux débris le long de la voie, il est préférable de le placer en hauteur. Nous recommandons de le monter à la hauteur du toit, mais une installation à la hauteur du capot est acceptable si elle permet de réduire la gêne due au bruit pour les collectivités riveraines et/ou l'équipe de train. Si le klaxon n'est pas

monté à l'avant, son efficacité devrait être démontrée à la vitesse maximale d'exploitation du train.

Nous croyons aussi que le rétrécissement de l'aire d'avertissement associé à un klaxon placé tout juste derrière l'échappement de toute locomotive circulant à plus de 30 mi/h est suffisamment important pour que l'on prenne la peine de déplacer le klaxon (ou qu'on en ajoute un autre ailleurs). Nous avons pensé à certaines options de klaxons de rechange, présentant chacune des inconvénients que les chemins de fer pourront évaluer en fonction de leur situation propre. L'une d'elles concerne un klaxon réservé aux cas d'urgence. Un tel klaxon, combiné à un ou même deux klaxons latéraux *normaux*, offrirait une couverture supérieure. Quant au klaxon à deux niveaux sonores, il présente des avantages particuliers pour les trains circulant dans des secteurs où le bruit risque de gêner les collectivités riveraines. Étendre l'usage du mode «fort» aux passages à niveau non automatisés où passent des trains grande vitesse augmenterait la sécurité, mais il faudrait évaluer si les avantages d'une telle mesure compenseraient la gêne causée dans la cabine de conduite. On pourrait l'adopter sur les lignes de trains de banlieue dotées de peu de passages à niveau non automatisés, mais pas sur les lignes interurbaines qui en comportent beaucoup. Une troisième option consisterait simplement à déplacer le klaxon à l'avant de la locomotive et à mieux insonoriser la cabine ou à fournir des protecteurs auditifs à l'équipe de conduite.

6 NOUVELLES OPTIONS : QUESTIONS D'EFFICACITÉ ET DE BRUIT

Comme il a été mentionné à la section 4.4, il ressort des mesures du SPL qu'il existe une atténuation du son en avant de la locomotive lorsque le klaxon est installé en retrait par rapport à l'avant de celle-ci. Cette atténuation est d'autant plus marquée que le train circule à grande vitesse et que le klaxon est monté directement derrière l'échappement. De concert avec VIA Rail et West Coast Express (WCE), nous avons étudié les trois solutions de rechange suivantes :

1. klaxon en milieu de locomotive existant, placé à une plus grande hauteur sur les locomotives Genesis de Via Rail, dont la ligne de toit en avant du klaxon est aérodynamique
2. klaxon réservé aux urgences monté sur la cabine d'une locomotive F40 de Via Rail
3. klaxon à deux niveaux sonores monté sur la cabine d'une locomotive F59 de WCE

La principale contrainte liée au déplacement du klaxon est l'effet sur le niveau sonore à l'intérieur de la cabine. La première option (mettant en jeu la locomotive Genesis de VIA Rail) ne rapproche pas le klaxon de la cabine : celui-ci est haussé au-dessus de la ligne de toit et les cornets extérieurs hautes fréquences sont surélevés par rapport aux autres, de manière à les écarter le plus possible des fréquences les plus facilement déviées. L'emplacement du klaxon existant (par rapport à la ligne de toit) et l'emplacement du klaxon surélevé sont illustrés à la figure 43. Le klaxon est situé du côté gauche de la locomotive, à environ 10 mètres de l'avant. Comme le toit de la Genesis est aérodynamique et que les dégagements assurés par VIA Rail le long de ses voies sont suffisants pour garantir une portée acoustique sans obstacle au signal émis par le klaxon, à la plupart des distances d'avertissement requises, cette hauteur d'élévation a été jugée suffisante.

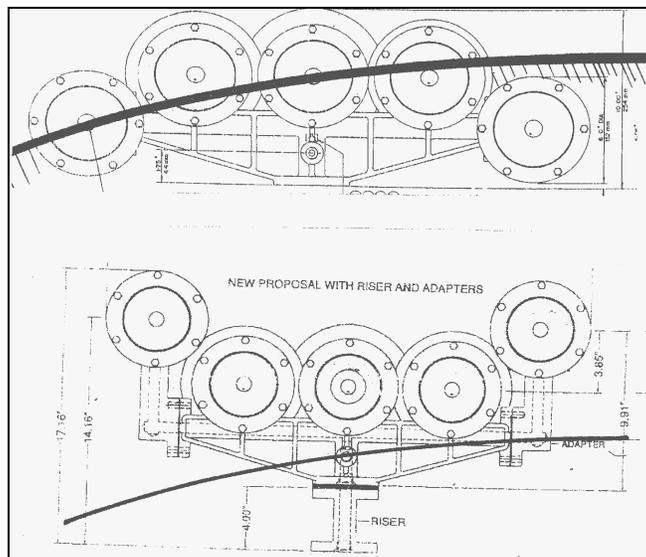


Figure 43 Illustration des modifications apportées au klaxon de la locomotive Genesis

Les deux autres options concernaient des klaxons installés à l'avant et nécessitaient des mesures pour pallier le problème du bruit dans la cabine de conduite. VIA Rail et WCE ont abordé différemment le problème. VIA Rail a décidé de monter à l'avant un deuxième klaxon à réserver aux cas d'urgence et d'aviser ses équipes de train de ne l'utiliser qu'en cas de danger appréhendé. Quant au klaxon existant, il devait être utilisé dans toutes les autres situations nécessitant un avertissement sonore.

WCE exploite un train de banlieue qui fait la navette entre Mission et Vancouver (C.-B.), sur un trajet qui comporte de nombreux passages à niveau en zone urbaine, et où le sifflet doit être actionné. La compagnie s'est montrée intéressée au klaxon à deux niveaux sonores. Lorsqu'il en perçoit le besoin, le mécanicien actionne le niveau «haut» du klaxon, qui atteint 113 dBA (30,5 m en avant de la locomotive). Le niveau des avertissements habituels a été limité à 102 dBA. À la vitesse normale d'exploitation, ce niveau sonore s'est tout de même révélé supérieur à celui du klaxon installé à l'emplacement existant. Il devrait donc permettre d'atténuer la gêne due au bruit dans les collectivités riveraines, par rapport au klaxon existant. En effet, la réduction prévue de 10 dB du niveau sonore projeté vers les côtés devrait être perçue par les résidents comme une diminution de 50 % du bruit. Ainsi, cette option permet à la fois d'améliorer l'efficacité de l'avertissement vers l'avant dans des conditions «normales» et, comme dans l'option retenue par VIA Rail, de produire le SPL maximal lorsqu'un danger est perçu.

Les trois klaxons ont été évalués en service payant. Les variables étudiées étaient :

- l'efficacité de l'avertissement;
- la gêne due au bruit dans les collectivités riveraines (le cas échéant);
- le niveau d'acceptation de la part des équipes de train.

Outre les mesures objectives du SPL, des sondages ont été menés auprès des équipes de train dans le but d'obtenir leurs commentaires sur l'efficacité de l'avertissement et sur d'autres effets des klaxons dans les cabines. Malheureusement, en raison du calendrier de l'étude et des retards à installer les systèmes, le nombre de réponses reçues a été insuffisant. Nous recommandons que les compagnies de chemin de fer participant à l'étude conservent les questionnaires du sondage ainsi que le matériel de surveillance vidéo après l'achèvement de la présente étude, de manière à aider les compagnies de chemin de fer à évaluer les réactions et les perceptions de leurs équipes vis-à-vis des klaxons proposés.

6.1 Efficacité de l'avertissement

Les options recommandées se fondent sur des analyses des caractéristiques d'urgence et de directivité du signal, deux facteurs essentiels à l'efficacité des klaxons sur le plan de la sécurité. Les klaxons montés à l'avant se sont révélés produire un son d'une intensité de 10 à 20 dB supérieure à celle des signaux émis par les klaxons installés en milieu de locomotive, derrière des obstructions. De plus, ils réussissent beaucoup mieux à transmettre le caractère impérieux du signal. Des mesures acoustiques ont tout de même été effectuées, pour confirmer que ces options produisaient les caractéristiques d'intensité attendues.

Le fait de hausser le klaxon sur la locomotive Genesis n'a pas produit d'aussi bons résultats que prévu (résultats traités au paragraphe 4.4.1). On a bien constaté une augmentation de l'intensité sonore, une diminution de la sensibilité aux conditions de vent et une augmentation considérable du contenu en fréquences hautes aux grandes vitesses. Mais le SPL projeté en avant de la locomotive n'était pas beaucoup plus haut. Des piétons pourraient le percevoir, mais il resterait inaudible dans nombre des scénarios de véhicules immobilisés présentés au tableau 9.

La figure 44 compare le niveau sonore du signal émis par le klaxon d'urgence de VIA Rail à celui de son klaxon habituel, à 90 mi/h. On peut constater que les résultats répondent aux attentes. La caractéristique du niveau sonore produit par le klaxon d'urgence à 90 mi/h se rapproche de celle du klaxon à 5 cornets installé à l'avant de la voiture à cabine de commande de GO Transit à 58 mi/h (voir la figure 16).

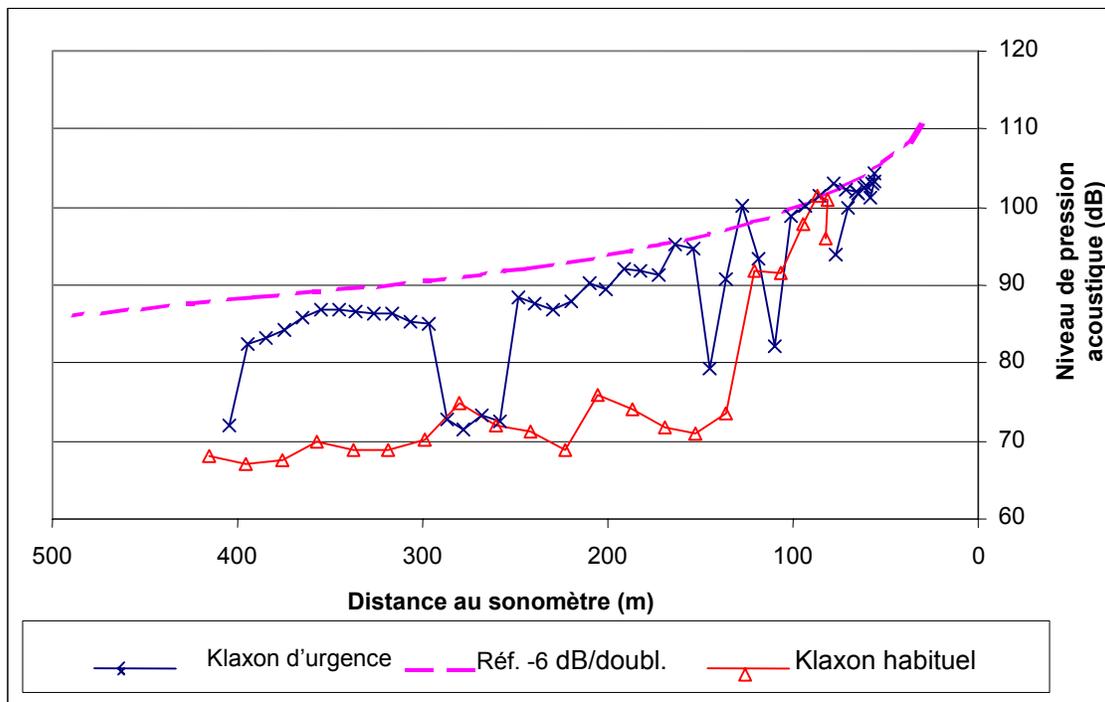


Figure 44 Comparaison klaxon d'urgence - klaxon monté en milieu de locomotive, à 90 mi/h

Un aspect préoccupant du prototype était que par suite de la modification, le klaxon d'urgence ne recevait pas toujours un débit d'air adéquat. Il se pourrait que la formation de condensation dans la longue conduite d'alimentation allant du robinet au nouveau klaxon ait fait geler la conduite. Ces défaillances mettent en lumière l'importance de placer le robinet à proximité du klaxon et d'installer une conduite de dimension suffisante pour alimenter un klaxon à 5 cornets.

Le klaxon à deux niveaux sonores de WCE a été monté sur le toit de la cabine, à environ 1,5 m derrière le carénage du toit, pour éviter tout risque d'interférence avec l'antenne (figure 45).

Il n'a pas affiché le même rendement que le klaxon d'urgence de VIA Rail, monté à l'avant de la locomotive.

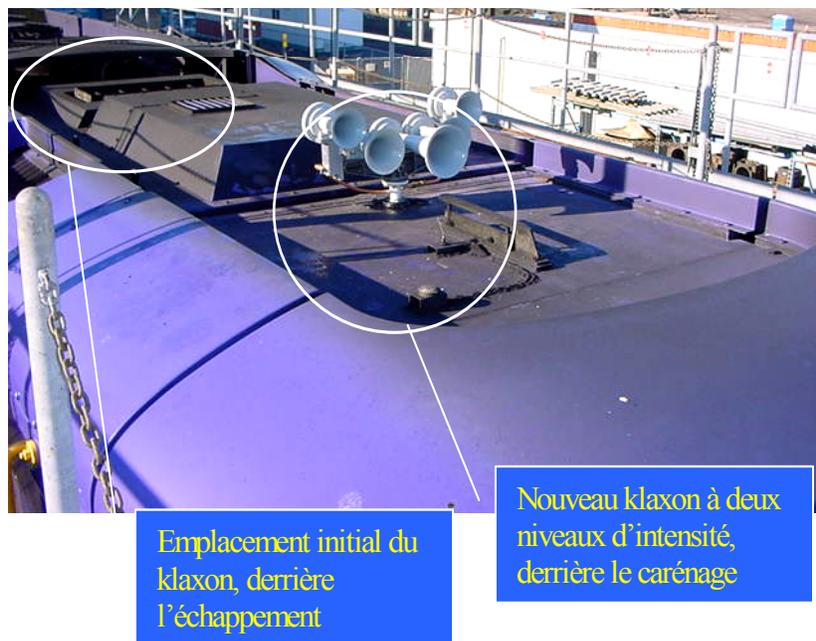


Figure 45 Emplacement du klaxon à deux niveaux d'intensité sonore monté sur le toit de la locomotive F59

La figure 46 compare les signaux émis par le klaxon à deux niveaux d'intensité de WCE et par le klaxon initial. On peut constater que les deux niveaux d'intensité produisent des niveaux sonores en avant de la locomotive qui sont inférieurs d'environ 6 dB au niveau qu'offrirait le signal non atténué. Le niveau sonore «bas» se rapproche de celui du klaxon existant, tandis que le niveau «haut» est d'environ 10 dB supérieur à celui du klaxon non surélevé, mais aux deux niveaux d'intensité, le son est affaibli vers l'avant. La turbulence causée par le carénage pourrait, croyons-nous, expliquer cette atténuation du son; mais la réfraction pourrait aussi avoir un rôle à jouer. Ces résultats sont des arguments de plus qui militent en faveur de klaxons montés à l'avant de la locomotive.

En tant que dispositif d'avertissement sonore, le klaxon monté à l'avant est clairement avantageux; mais les deux options essayées sont, par la force des choses, des solutions de compromis. C'est qu'il faut à chaque fois faire un arbitrage entre les gains d'efficacité d'avertissement et la gêne due au bruit engendrée dans la cabine de conduite et dans les collectivités riveraines. Les deux options de klaxons montés à l'avant obligent à une même compromission sur le plan de la sécurité : tous deux peuvent émettre un avertissement au maximum d'intensité permise, mais ils dépendent, pour cela, du mécanicien, qui doit avoir conscience d'une situation d'urgence potentielle. Ils conviennent donc aux situations d'intrusion, pour autant que le mécanicien voie les intrus à temps pour les alerter, mais ils peuvent être source de problèmes dans les zones où un avertissement sonore est exigé par prescription. Le NTSB [2000], dans ses commentaires sur le projet de règle sur les klaxons de la FRA,

estime que les klaxons à deux niveaux sonores risquent de causer une tension chez le mécanicien, qui a la responsabilité de faire le bon choix.

Lorsque des véhicules sont immobilisés à un passage à niveau non automatisé, il revient au mécanicien de décider s'il existe une situation d'urgence. Les résultats présentés au tableau 9 sont instructifs à cet égard. On pourrait considérer qu'il est prudent de donner un avertissement plus fort lorsque des véhicules qui ont besoin de plus de temps pour dégager la voie (autobus d'écoliers, ensembles tracteur-remorque) sont immobilisés à un passage à niveau non automatisé. Mais le même tableau montre que cette limitation est atténuée par le fait que dans le cas des trains grande vitesse, les véhicules routiers associés à de longs temps de passage n'entendraient pas le klaxon d'urgence, pas plus que le klaxon normal.

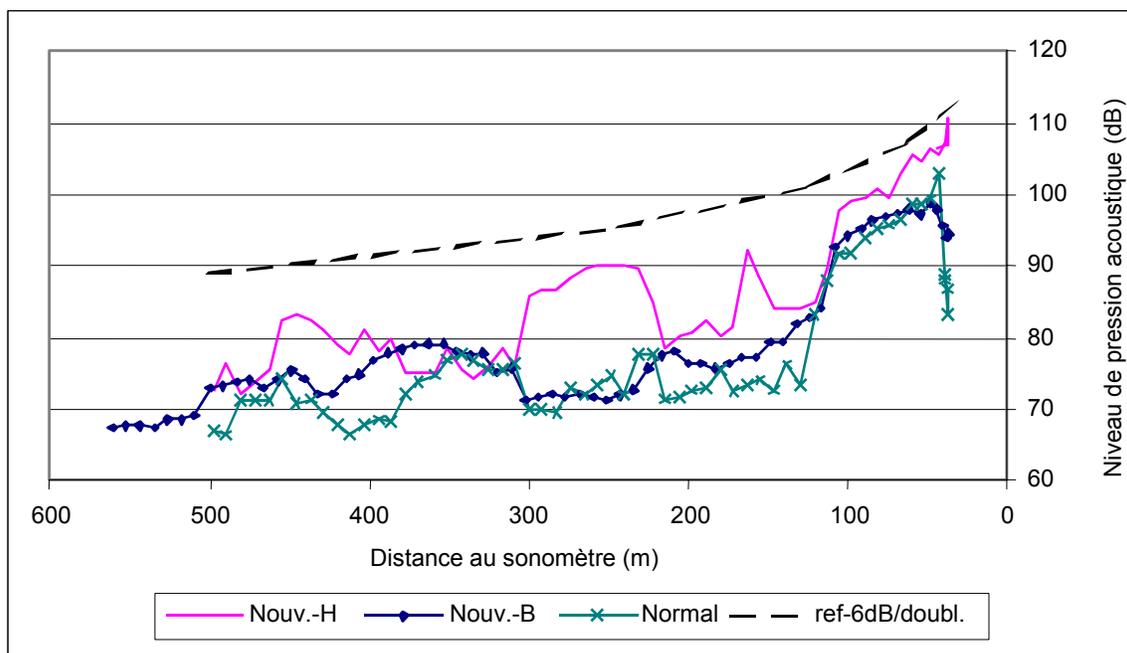


Figure 46 Comparaison d'un klaxon avant à deux niveaux sonores et d'un klaxon en milieu de locomotive, à 60 mi/h

Aux passages à niveau non automatisés où les lignes de visibilité sont telles qu'il y a risque que des véhicules routiers ne puissent être vus, le mécanicien peut avoir à prendre le même genre de décision. Si on revient à la figure 41, on remarque que le klaxon de la locomotive Dash-9 et celui de la SD-40 (du côté gauche) atteignent leur niveau sonore maximal à un angle qui est adéquat pour les véhicules qui s'approchent à 60 km/h. Mais tel n'est pas le cas de la locomotive GP9. Le klaxon réservé aux situations d'urgence ne sera efficace que s'il est placé sur une locomotive (comme la Dash-9) dont le son directionnel émis par le klaxon normal atteint sa pleine efficacité rapidement avec l'augmentation de l'angle latéral. Or, le klaxon normal des locomotives comme la GP9 et la F40 est situé à un emplacement tel qu'il n'est efficace que dans de très rares scénarios. Il reviendrait au mécanicien de ces locomotives de décider d'utiliser soit le klaxon d'urgence, soit un klaxon qui n'est efficace qu'à basse vitesse.

Sur ce type de locomotive, le klaxon à deux niveaux sonores offre un avantage par rapport au klaxon d'urgence, du fait que le niveau sonore bas donne un délai d'avertissement suffisant dans une plage de vitesses et de configurations plus étendue. Mais il n'empêche qu'il offre aussi un niveau sonore élevé et qu'il revient au mécanicien de décider quand celui-ci doit être actionné. Nous croyons que les compagnies de chemin de fer qui adoptent soit le klaxon réservé aux urgences soit le klaxon à deux niveaux sonores devraient stipuler, dans leurs règles d'exploitation, que le niveau sonore élevé doit être utilisé aux passages à niveau où la visibilité est mauvaise.

Comme il a été mentionné à la section 5.4, le son produit par les klaxons placés tout juste derrière l'échappement des locomotives (comme la GP9 et la F40) est tellement atténué que nous estimons impératif de corriger la situation. Nous ne disposons pas de suffisamment de détails sur les types et la fréquence des accidents pour évaluer les répercussions de l'aire d'avertissement réduite en avant des nouvelles locomotives comme la Dash-9 (voir ci-dessus). Il nous faudrait aussi plus de données d'essai pour juger s'il est possible d'améliorer de façon sensible ces klaxons en les haussant. L'ajout, à l'avant, d'un klaxon réservé aux urgences n'augmenterait pas de façon notable le niveau de bruit dans la cabine de conduite. Si les compagnies de chemin de fer n'installent pas volontairement un klaxon d'urgence à l'avant de ces locomotives, il faudra effectuer d'autres analyses de données accidentologiques pour évaluer les coûts et avantages d'une telle mesure.

6.2 Gêne due au bruit dans les collectivités riveraines

Parmi les effets indésirables du bruit figurent l'insomnie, la baisse de productivité, l'inconfort psychologique et la gêne. Ces paramètres sont difficilement quantifiables, mais comme ils touchent des lieux d'habitation, il arrive souvent qu'une équation est établie entre l'ampleur du préjudice et la perte de valeur d'une propriété. De nombreuses études utilisent un indice de dépréciation due au bruit (IDB), qui représente la diminution de la valeur d'une maison exprimée en pourcentage par dBA au-delà d'un seuil sonore prédéfini. Les enquêtes touchant le bruit au voisinage d'aéroports menées de 1967 à 1990 ont débouché sur un IDB moyen de 0,62 %/dBA, soit la même valeur que les enquêtes sur le bruit à proximité de routes menées au cours de la même période [English et coll., 2000].

Il est intéressant de noter que l'avantage découlant d'une analyse des coûts sociaux est plus élevé lorsque l'on adopte la perspective des coûts de réparation des dommages et préjudices plutôt que celle des coûts de prévention. Ainsi, la FRA a utilisé, dans son analyse, un facteur «coûts de prévention», soit les frais assumés par les municipalités pour doter les passages à niveau de dispositifs de protection suffisants pour permettre l'abolition du sifflement des trains. Sur ces bases, l'effet sur la gêne due au bruit dans les collectivités a été évalué à environ 35 % de l'effet sur la sécurité, exprimé par la diminution du nombre des accidents avec tués et blessés.

À l'heure actuelle, il n'existe pas de données qui permettraient d'établir avec précision le nombre d'unités d'habitation dont les occupants peuvent être gênés par les klaxons de locomotives. Nous savons que Transports Canada est à élaborer une base de données géographique des passages à niveau, qui pourrait en principe être liée aux données du recensement. On connaît les densités de population et d'unités d'habitation d'après les données du recensement de 1996, qui peuvent être

consultées sur CD-ROM¹⁰. Or, il est possible de déterminer facilement les densités pour les grandes divisions politiques ou de recensement, car il s'agit des seules unités pour lesquelles Statistique Canada inclut le secteur de dénombrement. Dans les petits secteurs de dénombrement (SD), le secteur n'est pas publié. Les SD comprennent habituellement de 100 à 400 unités d'habitation. Statistique Canada offre en vente un fichier à codes SIG des frontières des SD (autour de 20 000 \$ pour l'ensemble du Canada), mais un tel achat dépassait la portée du présent projet.

En l'absence de données d'exposition au bruit, nous quantifions la portée des sons émis par le klaxon à deux niveaux sonores, mais notre analyse ne se poursuit pas au niveau suivant, qui consisterait à évaluer la valeur d'une telle solution pour la collectivité.

6.2.1 Définitions

La gêne engendrée dans la collectivité par un bruit indésirable ne dépend pas seulement de l'intensité de celui-ci. L'heure à laquelle il se produit, son spectre de fréquences, sa durée, la fréquence à laquelle il se fait entendre et la hauteur des sons sont autant de facteurs qui influent sur le niveau de gêne. Le réseau de pondération A est l'outil adopté universellement pour caractériser la gêne relative associée aux différentes fréquences composant un bruit. Voici quelques mesures utilisées dans la présente section, ainsi que leur définition :

- SPL (dBA) : *niveau de pression acoustique pondéré en A* produite par un bruit à tout moment – de l'anglais *Sound Pressure Level*.
- L_{max} : *niveau sonore maximal* (ou la composante la plus élevée) d'un seul événement bruit.
- SEL ou *niveau d'exposition sonore* : valeur moyenne du niveau de bruit émis par un seul événement bruit pendant toute sa durée. Aux fins du calcul du SEL, la durée normalisée d'exposition au bruit est d'une seconde, ce qui permet de comparer l'énergie sonore dissipée par différents événements bruit – de l'anglais *Sound Exposure Level*.
- $L_{eq(p)}$ ou *niveau continu équivalent* : valeur moyenne du niveau de bruit émis par toutes les sources pour une période déterminée (p).
- L_{dn} ou *niveau sonore jour-nuit* : valeur moyenne du niveau de bruit émis par toutes les sources pour une période de 24 heures, avec une augmentation de niveau équivalant à 10 dB entre 22 h et 7 h, pour tenir compte de la sensibilité accrue au bruit la nuit. L_{dn} est le descripteur le plus couramment utilisé dans les évaluations de bruit d'environnement – de *Day-Night Sound Level*.

Dans son ébauche d'énoncé d'impacts sur l'environnement rédigée en marge de son projet de règle sur les klaxons [U.S. DOT, 1999], la FRA fait remarquer qu'un grand nombre d'enquêtes sur les attitudes indiquent que le bruit relié au transport est l'une des plus grandes sources de gêne dans les collectivités. Ces enquêtes révèlent que :

- lorsque le L_{dn} atteint 45 dB, le degré de forte gêne dans la collectivité est d'en moyenne 0 %,

¹⁰ Statistique Canada, GéoSuite, n° de catalogue : 92F0085XCB ISBN : 0-660-59272-X.

- lorsque le L_{dn} est de 60 dB, environ 10 % des répondants déclarent un degré de gêne élevé, tandis que
- lorsque le L_{dn} est de 85 dB, la proportion des gens qui disent ressentir une grande gêne est d'environ 70 %.

La FRA a établi deux seuils de gêne due au bruit dans la collectivité, s'inspirant en cela des normes du Department of Housing and Urban Development (HUD) des États-Unis, qui définissent les critères auxquels doit répondre un milieu sonore pour qu'un projet d'ensemble résidentiel puisse recevoir une subvention gouvernementale. Selon les normes HUD, un L_{dn} inférieur à 65 dBA est considéré «acceptable», tandis qu'un L_{dn} supérieur à 75 dBA est «inacceptable». Nous nous sommes à notre tour inspirés de ces normes pour établir des seuils de gêne due au bruit dans les collectivités, comme suit :

- L_{dn} = 65 dBA est le seuil de *gêne* due au bruit, tandis que
- L_{dn} = 75 dBA est le seuil de *forte gêne*.

L'étude de la FRA avait une perspective différente de la nôtre. Elle visait principalement à évaluer l'effet de l'abolition du sifflement des trains, tandis que nous nous intéressons à l'effet de la modification des caractéristiques des klaxons de locomotives.

6.2.2 Efficacité à atténuer la gêne due au bruit dans la collectivité

Nous avons examiné les effets que produirait sur les collectivités la mise en place d'un hypothétique klaxon à 3 cornets à rayonnement conformé (*pattern control*). C'est que les avantages d'un klaxon à rayonnement conformé (pour ce qui est des niveaux de bruit dans la cabine – voir 6.3) se répercuteraient jusqu'à un certain point sur le niveau d'exposition sonore dans les collectivités riveraines. La solution qui consisterait à ajouter après coup un dispositif à rayonnement conformé a peu de chances d'être retenue, en raison de la complexité et du coût d'une telle tâche. Mais on pourrait obtenir un effet semblable dans les nouvelles locomotives, en encastrant un klaxon dans la caisse. L'efficacité d'un hypothétique klaxon à 3 cornets à rayonnement conformé est examinée à l'annexe F. Ce klaxon offre une diminution telle du L_{dn} qu'il faudrait 40 trains par jour pour que le L_{dn} associé à une forte gêne soit atteint, alors qu'il suffit de 10 trains équipés des klaxons existants pour y arriver.

Parmi les nouvelles options de klaxons mises à l'essai, seul le klaxon à deux niveaux sonores installé sur la locomotive de WCE mènerait à une réduction de la gêne due au bruit dans les collectivités riveraines. Les autres options étaient dictées par l'impératif d'améliorer la sécurité sans augmenter la gêne due au bruit chez les riverains. Déplacer le klaxon existant vers l'avant en fournissant aux équipes de train des dispositifs de protection antibruit aurait, encore là, peu d'effet sur les niveaux de bruit dans la collectivité. Quant au klaxon d'urgence envisagé par VIA Rail, il accentuerait légèrement la gêne due au bruit chez les riverains, car au klaxon normal, qui resterait inchangé, serait ajouté le klaxon d'urgence, qui produirait un niveau sonore plus élevé, mais qui serait (présument) rarement utilisé.

Nous avons eu recours à des méthodes analytiques pour évaluer l'effet qu'aurait le klaxon à deux niveaux sonores sur les niveaux de bruit dans les collectivités riveraines. Le klaxon à deux

niveaux sonores produit un SPL de 10 dB de moins en mode normal qu'en mode d'urgence. Comme le mode d'urgence est rarement nécessaire, l'effet sur la collectivité est déterminé d'après le SPL produit en mode normal, lequel est comparé au SPL produit par le klaxon à son emplacement actuel sur la locomotive. Ce dernier produit un SPL qui est atténué de plus de 10 dB en avant, mais qui n'est nullement atténué vers les côtés.

Les courbes polaires correspondant au son produit par le klaxon à son emplacement actuel et au niveau normal du klaxon à deux niveaux sonores ont été utilisées comme sources sonores. Nous avons calculé le niveau d'exposition sonore (SEL) associé à un train roulant à 60 mi/h et produisant la séquence sonore stipulée par la règle 14(L)(ii) (deux longs coups, un coup bref, un long coup) : le klaxon se faisait alors entendre pendant 11 des 15 secondes du temps d'approche du train. Nous avons tenu compte d'un effet d'écran nominal attribuable à la présence d'immeubles qui affaiblissent les niveaux sonores, en corrigeant les valeurs prévues de propagation du son en plein air à l'aide des mesures du niveau de bruit publiées dans une étude effectuée à Mundelein, Illinois [Lucke et coll., 2002]. Le tableau 13 donne les valeurs de SEL maximal mesurées à Mundelein en regard des prévisions dérivées de notre modèle analytique, pour ce qui est du klaxon existant à 3 cornets monté en milieu de locomotive. On trouve dans les deux colonnes de droite les valeurs obtenues avec et sans effet d'écran. Cette différence s'établit en moyenne à 0,19 dB pour le modèle avec effet d'écran et à 8,3 dB, pour le modèle sans effet d'écran.

Tableau 13 Calage du modèle de SEL sur les données de Mundelein

N° du site	Distance par rapport à la voie (pi)	Distance par rapport au passage à niveau (pi)	SEL max. (dB)	SEL – modèle (dB)	Différence avec effet d'écran (dB)	Différence sans effet d'écran (dB)
0	354	401	90,2	102,2	12,0	15,8
1	1 763	2 608	80,5	81,6	1,1	11,9
2*	1 354	1 383	94,5	88,1	-6,4	2,7
3	950	1 214	91,3	92,3	1,0	8,5
4	1 162	1 214	84,0	90,0	6,0	14,4
5	1 550	1 550	81,9	85,9	4,0	13,9
6**	544	597	88,6	98,2	-0,4	4,9
7	1 901	3 379	80,9	75,0	-5,9	5,9
8	422	1 943	91,5	83,9	-7,6	-1,7
9	1 531	1 848	88,4	86,4	-2,0	7,7

* Ce site était le seul où aucun obstacle n'entravait la propagation du son depuis la voie.

** Mesure prise à l'intérieur; un facteur d'atténuation de 10 dB est inclus dans le calcul de la différence.

Comme l'indique le tableau 13, le facteur de correction pour l'effet d'écran a été établi à partir d'une étude où les SEL recueillis étaient des valeurs maximales plutôt que des moyennes. Nous avons fait une autre comparaison en utilisant cette fois des moyennes, soit celles obtenues à 14 sites par Multer et Rapoza [1998], dans leur étude menée à Gering, Indiana. Or, les SEL prévus par le modèle pour ce qui est du klaxon existant à 3 cornets monté en milieu de locomotive (avec l'effet d'écran) dépassent de 6 dB les SEL moyens rapportés pour Gering. Mais, comme notre but est d'établir une comparaison entre deux types de klaxons, que l'on utilise des moyennes ou des maximums a peu d'importance.

Le son émis par un klaxon monté à l'avant est plus faible, mais comme il est davantage focalisé vers l'avant de la locomotive, il est plus intense aux angles faibles. Par conséquent, dans le cas du klaxon à deux niveaux sonores, c'est aux distances les plus grandes de la voie que l'effet d'atténuation du bruit est maximal. À de faibles distances latérales, le niveau d'exposition sonore est plus élevé dans le cas d'un klaxon à deux niveaux sonores que dans celui d'un klaxon monté en milieu de locomotive. Cela est illustré à la figure 47, qui montre l'effet d'atténuation le long de la voie à des distances latérales fixes de 200 m et de 600 m. Les valeurs représentent le niveau d'exposition sonore moyen dans le cas de trains venant en sens opposé. Par exemple, à une distance de 800 m du passage à niveau, le long de la voie, une personne se trouvant à 200 m de la voie bénéficierait d'une diminution de seulement 1 dB du niveau d'exposition au bruit avec le klaxon à deux niveaux sonores, tandis que pour une personne se trouvant à 600 m de la voie, la diminution serait de 10 dB.

En supposant que le trafic ferroviaire est équivalent dans les deux sens, l'effet de l'autre côté du passage à niveau sera le «miroir» de l'effet illustré. On peut voir que le niveau d'exposition au bruit est plus faible partout, mais que c'est à proximité du passage à niveau que le klaxon à deux niveaux sonores est le plus efficace pour atténuer le bruit. Il ne faut pas oublier que le SEL intègre des SPL émis pendant une période donnée. Ainsi, les valeurs SEL sont plus élevées que le niveau sonore maximal atteint pendant la séquence sonore du klaxon. Aussi, les trains lents, qui entraînent une exposition relativement longue au sifflement, produisent des valeurs SEL plus élevées. L'inverse est vrai pour les trains rapides.

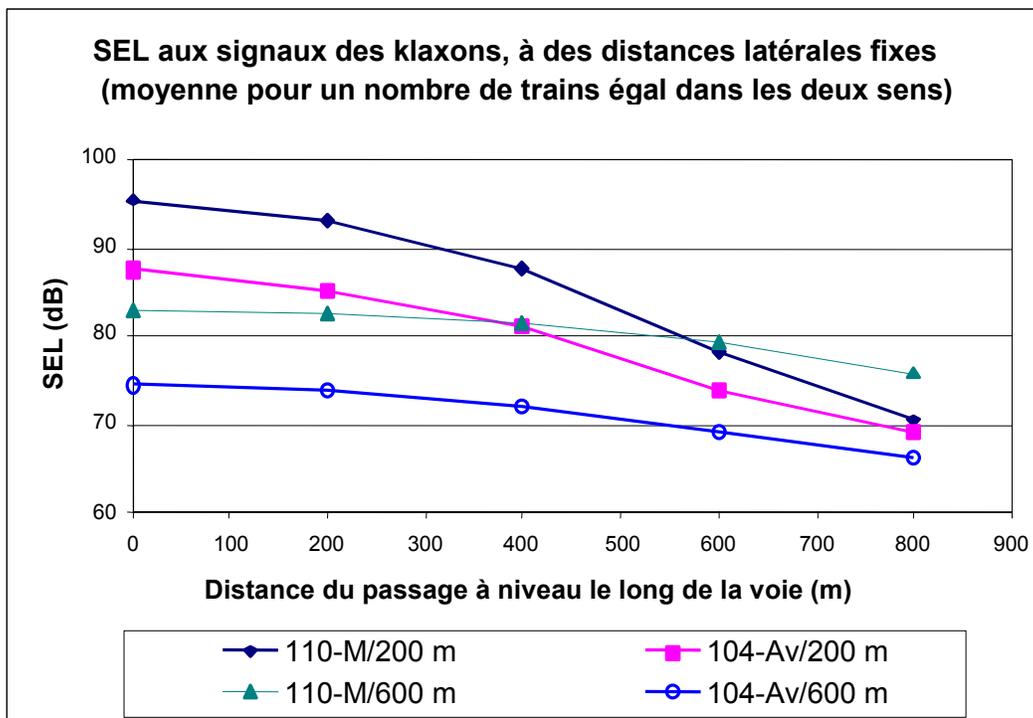


Figure 47 Comparaison du SEL aux signaux des klaxons, à des distances latérales fixes

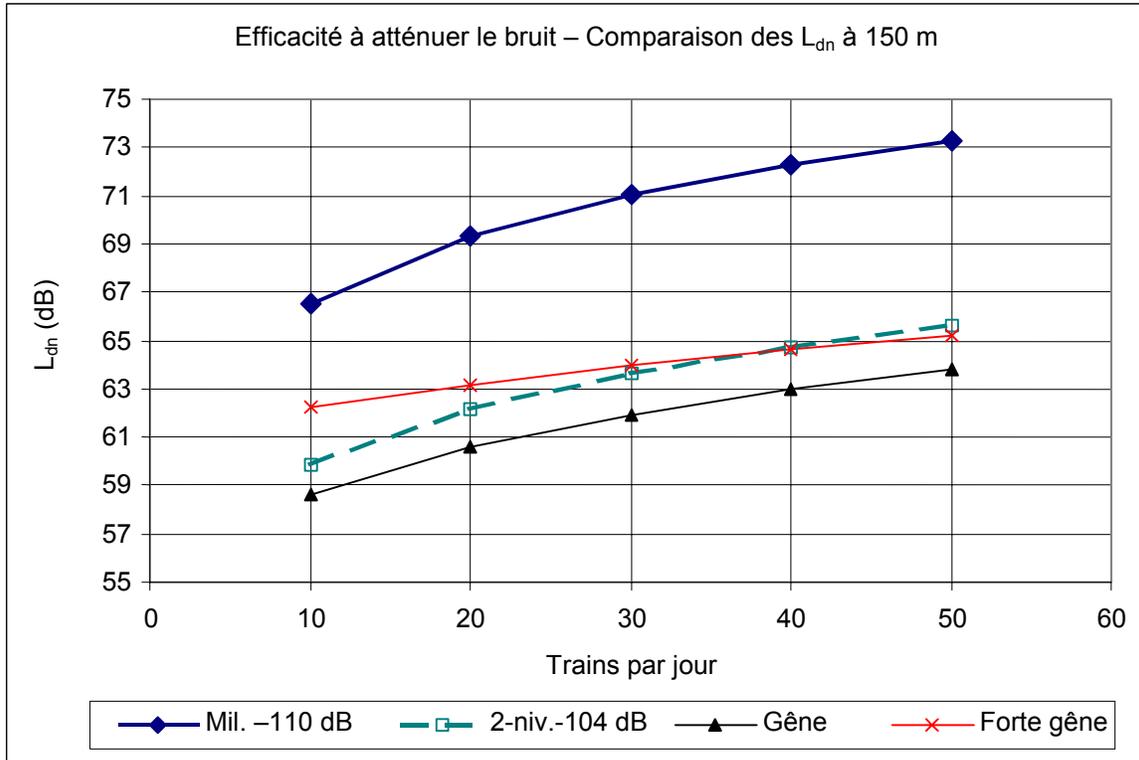


Figure 48 Comparaison de l'effet sur la collectivité selon le nombre de trains par jour

L'autre mesure de l'effet sur la collectivité étudiée est le niveau sonore jour-nuit (L_{dn}). Pour le calcul du L_{dn} , nous avons adopté certains aspects de la méthode utilisée par la FRA (tableur *horn model* du site Web de la FRA – www.fra.dot.gov) dans son évaluation environnementale du projet de rétablir le sifflement des trains là où il avait été aboli. La FRA pose comme hypothèse que le bruit engendré par le train (à l'exclusion des sons émis par le klaxon) fait partie du milieu sonore ambiant et qu'il s'ajoute au L_{eq} de référence. Selon son analyse de données sonométriques obtenues antérieurement, le bruit engendré par le passage d'un train au passage à niveau affiche un L_{eq} d'environ 10 dB inférieur au L_{eq} , klaxon compris. Nous avons donc utilisé cette valeur (10 dB) pour augmenter le L_{dn} de référence de façon à rendre compte de l'augmentation de la fréquence des trains, et évalué le niveau sonore à 150 m du train au passage à niveau, à un angle de 90 degrés par rapport à la voie. Nous avons supposé des nombres de trains égaux dans les deux sens, de même que pendant les périodes «nuit» et «jour». Nous avons également établi qu'ils se déplaçaient tous à 60 mi/h et que leurs klaxons produisaient tous le SEL évoqué dans le présent paragraphe. La figure 48 illustre l'effet sur le bruit dans la collectivité d'une augmentation de la fréquence de trains équipés d'un klaxon normal et de trains équipés d'un klaxon à deux niveaux sonores. On constate qu'avec le klaxon à deux niveaux sonores, la fréquence des trains à laquelle le seuil de *forte gêne* est atteint n'est plus de 10 trains par jour (comme avec le klaxon normal), mais de 40 trains par jour.

La figure 49 illustre l'aire de réduction de l'exposition au bruit autour d'un passage à niveau. La moitié supérieure de la figure montre l'effet du klaxon existant monté en milieu de locomotive, et la moitié inférieure, celui du klaxon à deux niveaux sonores.

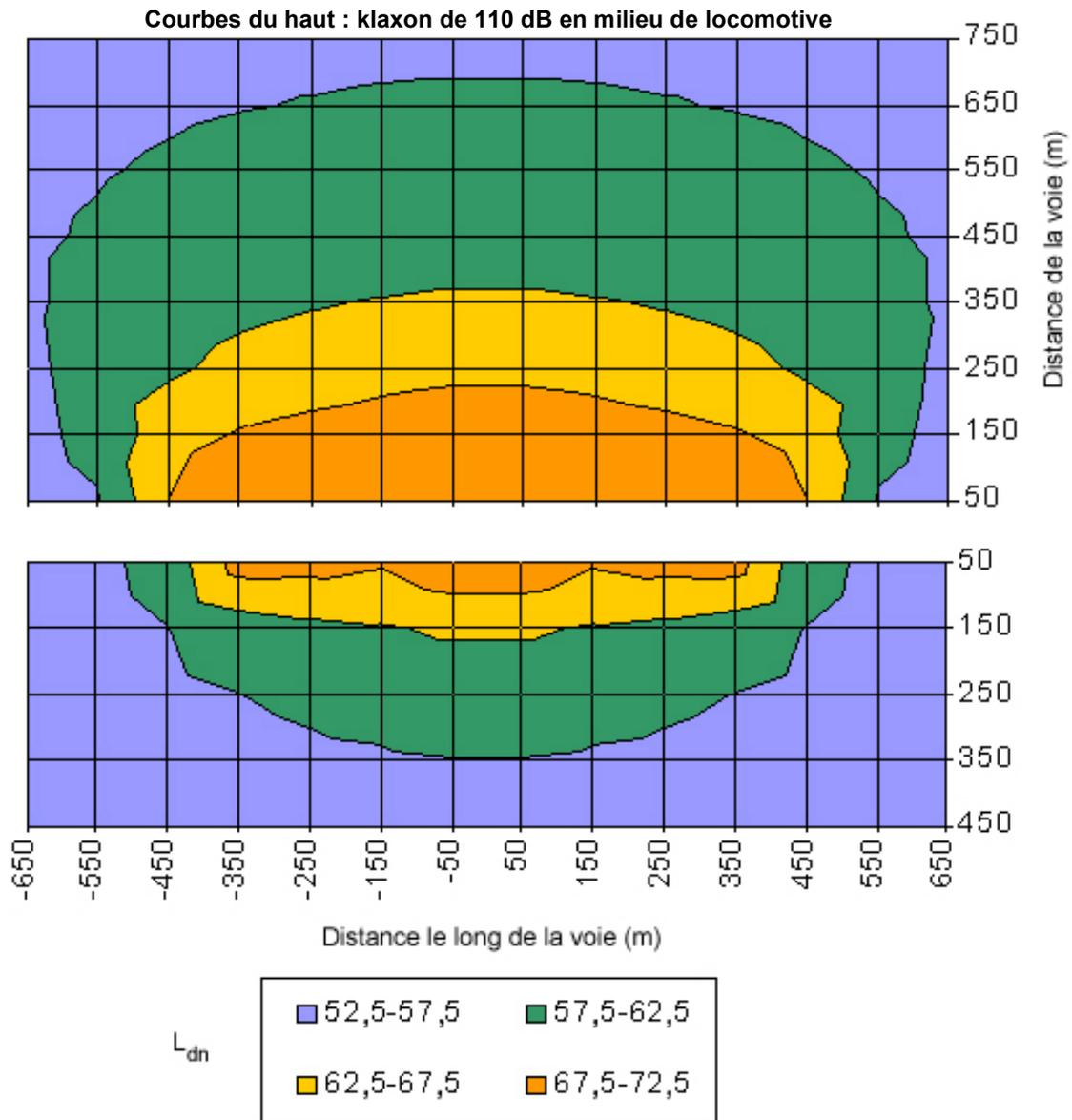


Figure 49 Comparaison de l'aire de réduction du L_{dn} autour du passage à niveau

La gêne due au bruit engendrée par l'un et l'autre des klaxons est à peu près équivalente à proximité de la voie, mais à partir d'une certaine distance, la portée acoustique totale du klaxon à deux niveaux sonores n'est plus que de 40 % environ de la portée du klaxon en milieu de locomotive. Voici l'effet total de l'utilisation du klaxon à deux niveaux sonores plutôt que du klaxon existant :

- Diminution de la zone de *forte gêne* 2,73 dB-km²
- Diminution de la zone de *gêne* 2,89 dB-km²
- Diminution totale 5,62 dB-km²

D'autres moyens ont été envisagés pour réduire la gêne due au bruit causée par les klaxons de locomotives. Par exemple, les klaxons en bordure de voie, évoqués au paragraphe 1.2. Une autre solution serait de rendre le son du klaxon moins gênant. L'étude déjà ancienne d'Aurelius et Korobow [1971] débouchait sur la recommandation de klaxons à 5 cornets, notamment parce que le son produit était moins gênant. Le klaxon à deux niveaux sonores mis à l'essai par WCE comportait une combinaison à 3 cornets qui produisait un son harmonieux pour les situations normales et une combinaison à 5 cornets qui produisait un son dissonant, pour les situations d'urgence.

La LIRR (Long Island Railroad) a récemment apporté des changements destinés à réduire la gêne due au bruit¹¹. Ainsi, elle a modifié l'accord joué par le klaxon K-5LA à 5 cornets qui équipe ses locomotives. De plus, elle a demandé à l'équipementier de monter le klaxon au milieu de la locomotive, dans un renforcement. Voici les changements apportés :

- montage du klaxon à l'avant, au-dessus de la cabine de commande;
- remplacement de l'électro-aimant par une commande manuelle;
- remplacement du cornet 622 Hz par un cornet 261 Hz, du cornet 494 Hz par un cornet 512 Hz, et du cornet 415 Hz par un cornet 470 Hz;
- réglage du klaxon pour qu'il pointe légèrement vers le bas.

Ces modifications avaient un double motif, soit de satisfaire au projet de nouvelle règle de la FRA et de répondre au grand nombre de plaintes venant des collectivités. En déplaçant le klaxon vers l'avant, on se conformait à la nouvelle règle envisagée par la FRA concernant la directivité (voir l'annexe A), tandis qu'en abaissant les fréquences, on visait à rendre le son plus acceptable dans les collectivités riveraines. De plus, la commande manuelle permettait à l'équipe de train de réduire le volume sonore lorsque le besoin d'avertissement n'était pas pressant. Selon la LIRR, les deux klaxons affichaient une efficacité d'avertissement amplement satisfaisante.

La LIRR avait envisagé de placer le klaxon sous le niveau du capot, mais cette option a été écartée en raison de la complexité et du coût de la conversion. Elle a aussi envisagé, pour l'écartier par la suite, un klaxon à deux niveaux sonores (niveau sonore élevé à grande vitesse), misant plutôt sur le nouvel accord du klaxon à 5 cornets que les collectivités, croyait-elle, seraient assez enclines à mieux accepter, même à pleine puissance.

6.3 Niveau d'acceptation de la part des équipes de train

Transports Canada a son propre règlement sur la sécurité au lieu de travail qui régit les niveaux de bruit dans la cabine de conduite de la locomotive. Ce règlement s'inspire largement du *Règlement concernant la sécurité et la santé au travail* (SST), qui exige que des mesures soient prises pour réduire le niveau d'exposition au bruit avant que soit envisagé le port de protecteurs auditifs. Ainsi, la décision de déplacer le klaxon vers le milieu de la locomotive était dictée par le désir de respecter les recommandations du *Règlement concernant la SST*.

Ultimement, la raison d'être du klaxon est la sécurité. Les mesures prises à ce jour par les compagnies ferroviaires visaient à respecter les règles de sécurité imposées par la

¹¹ Correspondance personnelle avec Ron Leo, Long Island Railroad, Metropolitan Transportation Authority.

norme/réglementation existante, qui exige une intensité sonore de 96 dBA mesurée à 100 pi lors d'essais statiques. L'industrie s'est pliée aux essais recommandés pour s'assurer que toute mesure qu'elle pouvait prendre ne l'amenait pas à violer les exigences réglementaires/recommandées, établies d'après l'état des connaissances à l'époque. Or, nos résultats sont clairs : aux vitesses d'exploitation, l'efficacité du klaxon dépend de son emplacement sur la locomotive. Cette constatation fait pencher la balance, mais il reste nécessaire de trouver un compromis entre, d'une part, les impératifs de sécurité et, d'autre part, la diminution de la gêne due au bruit dans la collectivité et dans la cabine de conduite en tant que lieu de travail.

Un autre facteur vient compliquer le problème du bruit pour l'équipe de train, soit la mise à jour de la réglementation de TC sur la SST, qui abaisse le niveau maximal d'exposition au bruit. Cette révision vise à aligner les règles de TC sur la partie VII du *Règlement concernant la SST*, qui s'applique aux autres secteurs du gouvernement fédéral. Le règlement établit des intervalles d'exposition à un niveau sonore et il fixe une limite au niveau continu équivalent d'exposition pendant une période de huit heures. Le règlement en vigueur permet une durée d'exposition de huit heures à des niveaux sonores qui peuvent atteindre 90 dBA. La durée d'exposition diminue de moitié seulement lorsque le niveau sonore augmente de 5 dBA. Le nouveau règlement (en voie d'être adopté) limitera à 87 dBA le niveau sonore auquel un employé peut être exposé pendant huit heures et diminuera cette période de moitié à chaque augmentation de 3 dBA du niveau sonore.

La figure 50 illustre la limite établie par la réglementation existante et la nouvelle réglementation en ce qui a trait au niveau sonore produit par le klaxon dans la cabine. Elle indique le niveau sonore maximal absolu qu'est autorisé à produire un klaxon dans le cas où le niveau sonore ambiant est faible par ailleurs. Là où l'ancienne réglementation autorisait un niveau sonore de 105 dBA, sur le trajet de VIA Rail représentant le pire scénario, la nouvelle réglementation n'autorisera plus que 96,9 dBA.

Le niveau d'exposition équivalent au bruit pendant huit heures $L_{ex}(8)$ représente l'exposition au bruit émis par toutes les sources pendant la durée d'un quart de travail normalisée à huit heures. Pour un quart de huit heures, il s'agit simplement de la mesure du bruit émis par toutes les sources. En 1991, VIA Rail a effectué des mesures du bruit dans la cabine pour un certain nombre de ses locomotives, à des vitesses atteignant 95 mi/h. À l'époque, ses locomotives les plus récentes affichaient un niveau de bruit de fond moyen de quelque 83 dBA, dans la cabine, à plus de 80 mi/h. Dans la cabine des nouvelles locomotives Genesis de VIA Rail, le niveau de bruit ambiant est d'environ 78 dBA, à plus de 80 mi/h. Dans ses locomotives les plus anciennes, le niveau sonore dépasse les 83 dBA.

Pour évaluer l'effet des règlements sur le bruit sur les klaxons de locomotives, nous avons estimé la durée de l'exposition au son du klaxon à l'aide de données colligées par VIA Rail concernant plusieurs trajets effectués par ses trains. L'équipe de train était exposée au signal du klaxon pendant 6 % à 16 % du trajet. On nous a aussi dit qu'un cycle de travail normal comprend 3,5 heures en dehors de la cabine. Ainsi, le temps passé dans la cabine varie de 4 à 5,5 heures. Nous supposons que dans le pire des cas, l'exposition au son du klaxon dure 0,83 heure et que le niveau de bruit ambiant est de 83 dBA dans la cabine et de 77 BA, en dehors. Le niveau

de bruit ambiant dans la cabine influe sur le niveau sonore du klaxon admissible. Cette influence des niveaux de bruit ambiant est illustrée à la figure 51.

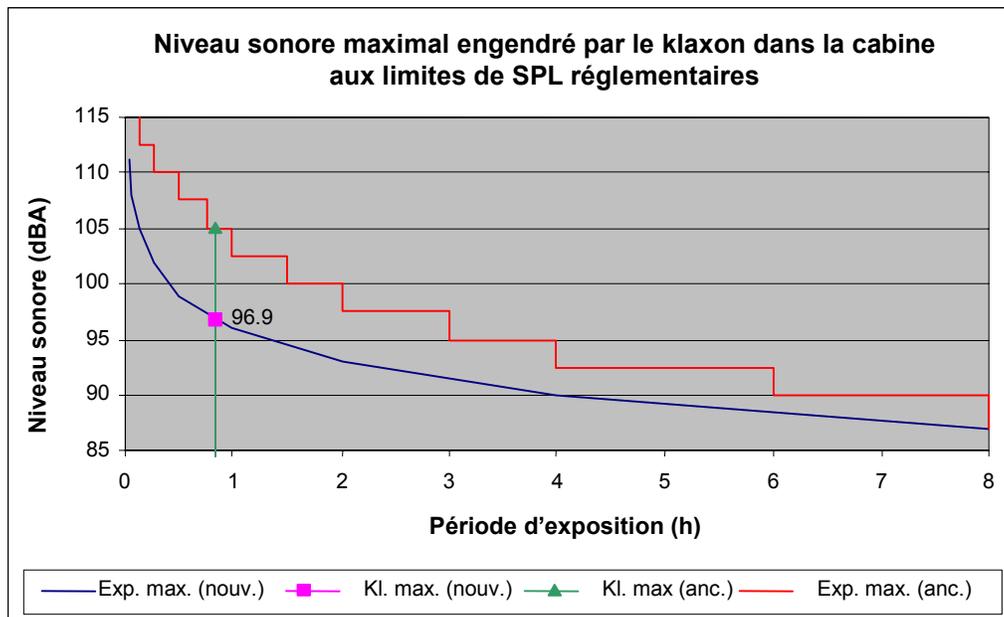


Figure 50 Influence de la réglementation sur le niveau de bruit dans la cabine sur le niveau sonore du klaxon

Il convient de noter que la décision de placer le klaxon au milieu de la locomotive a été largement dictée par le désir d'atténuer le bruit pour les équipes de train, car aussi bien à l'avant qu'au milieu de la locomotive, le klaxon satisfaisait à la règle des 96 dBA à 30,5 m de la FRA. Certes, comme le montre la figure 51, plus le niveau de bruit ambiant dans la cabine est faible, plus le niveau sonore du klaxon peut être élevé. Mais plus l'ambiance sera calme dans la cabine, plus le son du klaxon s'imposera avec force à l'équipe de train. Il se peut donc que l'équipe de train trouve encore à redire au klaxon de locomotive, même si celui-ci respecte la réglementation. Ainsi, même si un klaxon émettant un niveau sonore de 95 dBA peut être acceptable dans une cabine où le niveau de bruit ambiant est de 83 dBA, il serait préférable de viser 90 dBA.

Nos mesures du niveau sonore dans la cabine variaient selon l'âge de la locomotive ou de la voiture à cabine de commande. La figure 52 compare le spectre acoustique produit dans la cabine par des klaxons à 5 cornets montés sur la cabine d'une locomotive F40 du début des années 1980, sur la cabine de commande d'une voiture de Go Transit datant du milieu des années 1980, et sur la cabine de commande d'une voiture de WCE de la fin des années 1990. Les essais réalisés au Volpe Center sur divers emplacements du klaxon sur la cabine ont également révélé une sensibilité à l'âge de la locomotive [Rapoza et Fleming, 2001]. Ainsi, pendant que dans une locomotive récente, les niveaux sonores mesurés étaient de 91 dB, fenêtre fermée, et de 97 dB, fenêtre ouverte, dans une locomotive âgée, les niveaux sonores étaient d'environ 6 dB supérieurs, atteignant respectivement 97 dB et 105 dB.

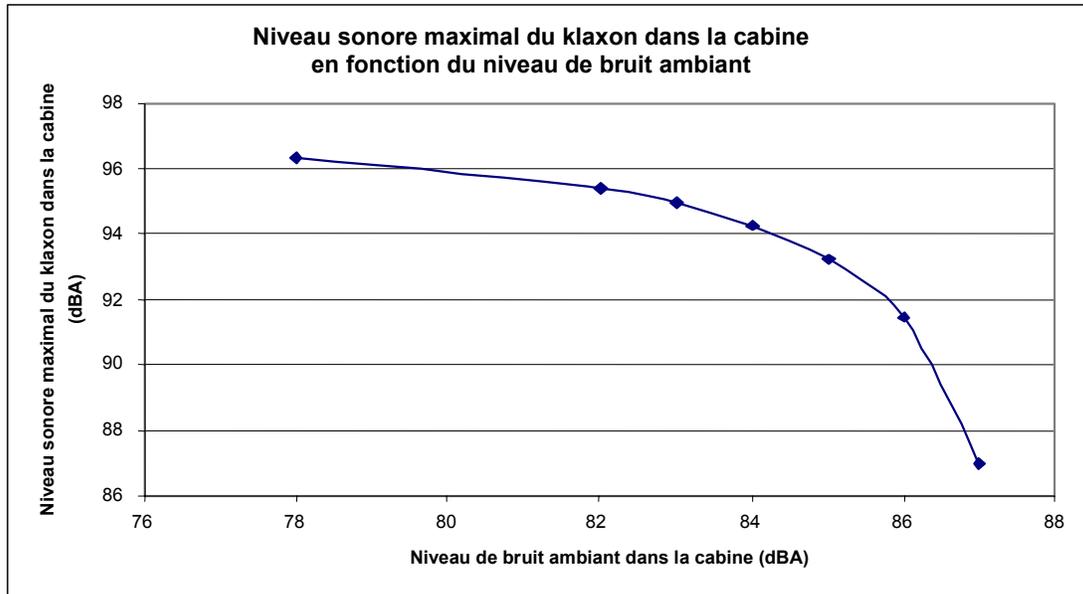


Figure 51 Influence du bruit ambiant sur la limite de niveau sonore du klaxon

Voici les résultats des mesures effectuées dans la cabine pour le klaxon à deux niveaux installé sur une des nouvelles locomotives F59 de WCE :

- 87 dBA (niveau normal) et 94 dBA (niveau d'urgence), fenêtres fermées;
- 93 dBA (niveau normal) et 104 dBA (niveau d'urgence), fenêtres ouvertes.

Le klaxon était placé au-dessus de la cabine de conduite plutôt qu'en avant, en raison des limitations structurales imposées par la longueur de la conduite d'alimentation pneumatique. Nous croyons que s'il était possible de le monter à l'avant, le niveau sonore dans la cabine se rapprocherait davantage des valeurs obtenues par Rapoza et Fleming sur de nouvelles locomotives, soit 97 dB, fenêtres ouvertes.

Le klaxon à deux niveaux sonores satisferait au *Règlement concernant la SST* lorsque actionné au niveau *normal*, avec les fenêtres ouvertes. Le niveau *haut* (d'urgence) respecterait aussi le règlement, mais à condition que les fenêtres soient fermées. Les locomotives âgées seraient conformes au règlement à condition que les fenêtres soient fermées et que le klaxon fonctionne au niveau *normal*. Dans le cas des locomotives anciennes, l'utilisation d'un klaxon à un seul niveau avec les fenêtres ouvertes nécessiterait la prise de mesures d'atténuation supplémentaires.

Nous notons en outre que lorsque des objections à l'installation du klaxon au-dessus de la cabine ont été exprimées, ni le port de dispositifs de protection antibruit ni les appareils de conditionnement d'air n'étaient courants dans les cabines de locomotive. Or, les bouchons d'oreille sont de plus en plus monnaie courante dans les cabines de conduite des chemins de fer canadiens, et les sociétés ferroviaires assurant le transport de voyageurs se sont mises à installer des appareils de conditionnement d'air dans les locomotives, autant nouvelles qu'anciennes.

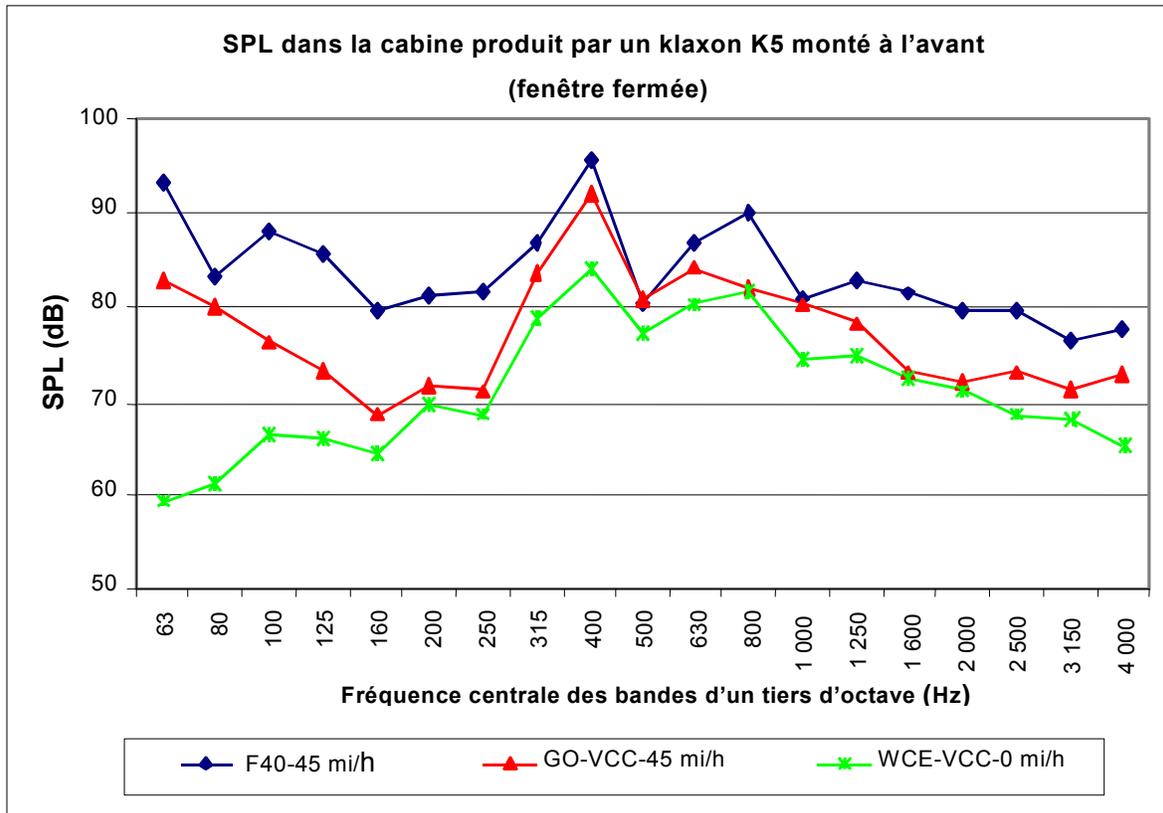


Figure 52 Spectres acoustiques à l'intérieur de cabines de locomotives de différents âges

Nous avons évalué l'efficacité des dispositifs de protection antibruit à diminuer les niveaux sonores associés au klaxon. Les propriétés d'atténuation ont été déterminées à partir d'essais indépendants plutôt que selon les données nominales du fabricant. Pour les bouchons d'oreille, les valeurs d'atténuation sont fondées sur la moyenne obtenue avec six types de bouchons [Edwards et coll., 1983], pour le serre-tête antibruit, sur les résultats obtenus avec une marque [Robinson et Casali, 1999], et les bouchons d'atténuation active du bruit, sur des essais réalisés dans des laboratoires universitaires [Matsubara et coll., 1999]. L'efficacité de ces divers dispositifs dans le cas du spectre acoustique du klaxon est illustrée à la figure 53. Les résultats agrégés sont résumés au tableau 14.

Comme on a utilisé la moyenne des six types de bouchons d'oreille, il serait possible de choisir celui, parmi les six, qui convient le mieux à l'environnement acoustique de la locomotive, et d'obtenir ainsi des résultats plus satisfaisants que les résultats moyens reproduits ici.

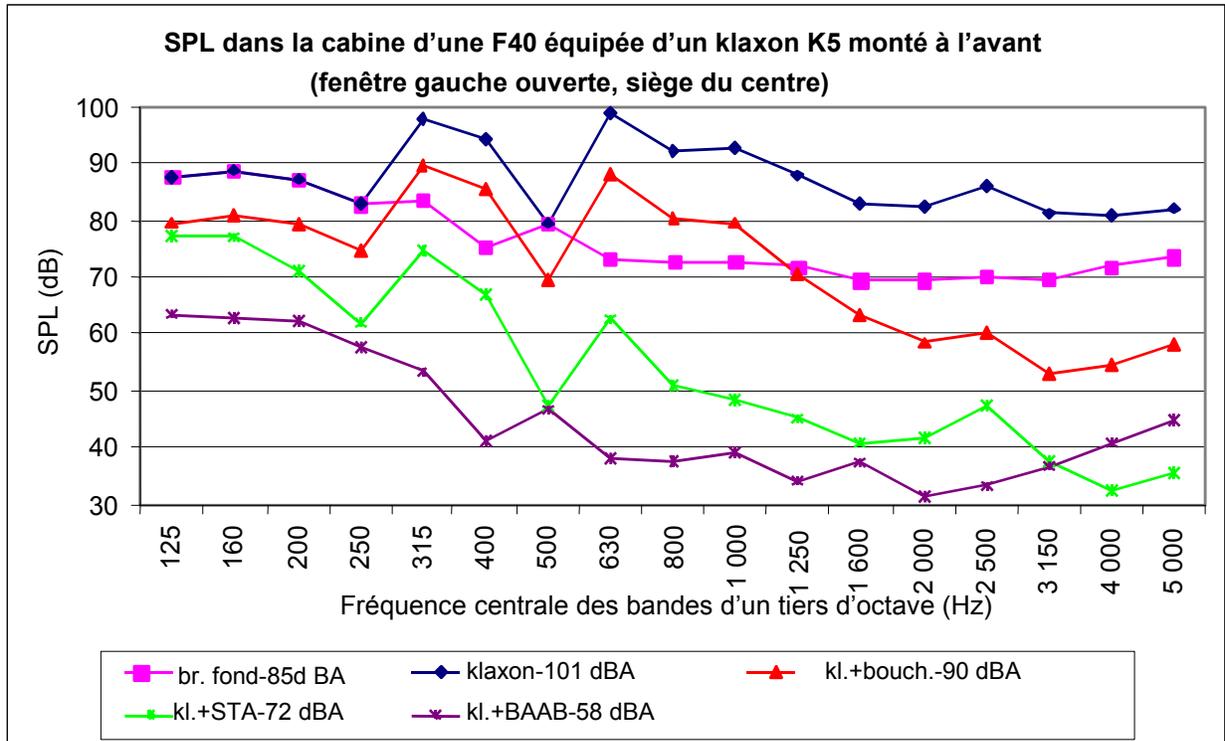


Figure 53 Efficacité des protecteurs auditifs

Comme le montre la figure 53, le bruit de fond engendré par la locomotive est plus élevé que le son du klaxon aux fréquences basses¹². Les bouchons d'oreille ramènent le son du klaxon à 90 dBA, ce qui est inférieur au seuil jugé nécessaire par le règlement sur la SST (93 dBA pour un niveau de bruit ambiant de 85 dBA, selon la figure 51). Les serre-tête antibruit (STA) ramènent le niveau sonore à 72 dBA, bien en deçà du seuil requis, tandis que les bouchons d'atténuation active du bruit (ANR, pour *active noise reduction*) le rabaisser à 58 dBA. Les serre-tête et les dispositifs ANR conviennent également aux situations où la fenêtre est ouverte, comme l'indique le tableau 14.

¹² Nous savons, par suite d'observations anecdotiques, que la gêne due au bruit est davantage causée par le son émis par la locomotive que par le klaxon. Ainsi, lors de nos mesures des niveaux sonores dans la cabine d'un train de banlieue de GO Transit, nous avons observé que les deux membres de l'équipe de conduite portaient des bouchons d'oreille lorsqu'ils se trouvaient au bout «locomotive» du train, mais qu'ils les enlevaient pour le trajet en sens inverse, alors qu'ils se trouvaient au bout «voiture à cabine de commande». Le niveau de bruit de fond, au bout «locomotive» (moteur/compresseur d'air/radio) était élevé, mais les fréquences étaient surtout basses. Dans la voiture à cabine de commande, le niveau de bruit de fond était beaucoup plus faible, soit 78 dBA. La fenêtre était ouverte et le klaxon était souvent actionné dans l'un et l'autre des sens de marche, et le SPL du klaxon mesuré à proximité de la fenêtre ouverte avoisinait les 105 dBA, aux deux bouts du train. Or, les membres de l'équipe de conduite ont indiqué que c'est le bruit du moteur qui les dérangeait le plus et que le klaxon représentait, de fait, une heureuse diversion à l'autre bruit.

Tableau 14 Niveau sonore dans la cabine d'une locomotive F40 équipée d'un klaxon K5 monté sur l'avant de la cabine

Fenêtre	Emplacement du sonomètre	Niveau de pression acoustique (dBA)			
		Aucune protection	Bouchons	Serre-tête antibruit	Bouchons ANR
Fermée	Centre	96	84	68	54
Ouverte	Centre	101	90	72	58
Ouverte	Siège près de la fenêtre	107	95	77	64

Le bouchon ANR est non seulement plus efficace que le serre-tête antibruit, mais aussi plus léger. Les dispositifs d'atténuation active du bruit peuvent éliminer complètement les sons purs, comme ceux qu'émet le klaxon de la locomotive, et atténuer le bruit aléatoire. L'utilisateur de bouchons ANR devrait donc les régler de façon qu'ils atténuent les sons purs sans les éliminer, de façon à pouvoir entendre le klaxon et les communications radio. Mais les coûts supplémentaires à l'achat et les besoins d'entretien continu que représentent ces dispositifs en font un choix peu probable, par rapport aux bouchons d'oreille standard ou aux serre-tête antibruit.

Le bouchon d'oreille est suffisant pour les locomotives climatisées, où il n'est pas nécessaire d'ouvrir les fenêtres. De plus, le port de ces bouchons n'atténuerait pas le son des communications radio et de la voix en deçà du seuil d'audibilité des 10 % d'hommes de 60 ans qui entendent le moins bien. Le modèle *Detectsound* [Laroche et coll., 1991], fondé sur la sommation de l'intensité acoustique [Zwicker et Scharf, 1965], tient compte de la déficience auditive associée au vieillissement. L'étude de Laroche, qui consistait à appliquer le modèle à la détection d'un signal au milieu de bruit par des personnes portant des bouchons d'oreille, a révélé qu'un homme de 60 ans qui se situe au 10^e percentile de la population pour sa capacité auditive a besoin de seulement 2 dB de plus qu'un homme de 18 ans pour pouvoir détecter le signal. Le signal utilisé dans l'étude se situait dans la gamme de fréquences de 800 à 2 500 Hz.

Chez les personnes à capacité auditive réduite, le port d'un serre-tête antibruit pourrait rendre les communications radio difficilement intelligibles. Donc, le protecteur idéal à porter dans la cabine se situe à mi-chemin entre le bouchon d'oreille et le serre-tête antibruit. Nous insistons encore une fois sur le fait que les données sur les bouchons d'oreille utilisées dans nos analyses étaient des moyennes établies à partir de six types de bouchons. Il se pourrait qu'un des types de bouchons offerts sur le marché assure la protection nécessaire sans nuire aux communications normales. Par ailleurs, on pourrait penser à un protecteur de type serre-tête qui serait conçu de façon à être moins efficace dans la gamme des fréquences vocales. Comme on l'a vu au paragraphe 3.2.3, notre modèle de masquage prédit le niveau de détection du son évoqué dans la littérature, pour une marque de serre-tête antibruit. Le modèle *Detectsound* de Laroche, qui accorde un traitement plus complexe à la perte auditive, peut aussi servir d'outil d'analyse du meilleur type de protecteur auditif pour l'environnement particulier des cabines de conduite. C'est pour détecter des signaux reliés à une hauteur tonale que ces deux outils sont le plus fiables. Pour ce qui est de la compréhension de messages verbaux, qui nécessitent un traitement plus complexe, il serait intéressant de pousser la recherche en invitant des membres d'équipes de train avec une déficience auditive à se soumettre à des essais dans un environnement simulé de cabine de locomotive. Nous remarquons que la qualité des signaux vocaux perçus sur les radios

des cabines laisse souvent à désirer. Il se pourrait qu'un microphone et/ou récepteur de meilleure qualité aide à atténuer le problème d'intelligibilité.

Un autre aspect dont il faut se préoccuper lorsqu'on s'attaque au problème du bruit dans la cabine, c'est le risque que les communications radio soient masquées par le klaxon. Nous ne disposons pas des données nécessaires pour élucider cette question. Des recherches sur la possibilité que les communications radio soient masquées par le bruit du klaxon s'imposent donc. En attendant, le klaxon est sous la responsabilité du mécanicien de locomotive et si un message radio essentiel pour la sécurité doit être reçu en même temps que serait normalement actionné le klaxon, nous suggérons que soit devancé ou repoussé l'avertissement, de façon qu'il ne nuise pas à la réception du message. Bien sûr, dans une situation d'urgence perçue, le klaxon l'emporterait. Si l'on constate que la concurrence klaxon-communications pose des problèmes importants, une autre solution est envisageable, soit le port d'un serre-tête antibruit accompagné d'écouteurs et d'un microphone pour les communications radio.

Le règlement sur la sécurité et la santé au travail exige que l'employé soit encouragé à porter des protecteurs auditifs lorsque le $L_{ex(8)}$ dépasse 84 dBA. Au delà de 87 dBA, l'employeur doit fournir des protecteurs auditifs, si toute autre solution d'atténuation du bruit est impossible. Le niveau de bruit dans les locomotives F40 de VIA Rail s'approche de la limite des 87 dBA, tandis que dans les locomotives Genesis, il est d'environ 78 dBA. Développement des ressources humaines Canada [2000] a effectué des essais à bord de locomotives de marchandises, essais qui se sont étalés sur des cycles de travail complets. Les données recueillies révèlent un L_{eq} moyen d'environ 83 dBA lorsque les fenêtres sont fermées, et de 87 dBA lorsque les fenêtres sont ouvertes. Il convient de noter que les essais réalisés au Volpe Center à l'aide de klaxons montés en milieu de locomotive ont révélé, dans la cabine, des niveaux sonores de 100 dB avec l'ancienne locomotive et de 95 dB, avec la locomotive récente, lorsque la fenêtre était ouverte. Ainsi, le fait de conduire la locomotive la fenêtre ouverte entraîne des niveaux sonores qui contreviennent au nouveau règlement sur la SST, peu importe l'emplacement du klaxon.

Même si, selon le règlement sur la SST, il est préférable de prendre des mesures pour atténuer le bruit à sa source avant d'imposer le port de protecteurs auditifs, nous croyons que les impératifs de sécurité auxquels répond le klaxon l'emportent sur les inconvénients associés au port de protecteurs auditifs. Nous recommandons que Transports Canada (à qui incombe la responsabilité de la sécurité du public et de la sécurité au travail des équipes de train) adopte des normes qui exigent que les klaxons soient placés là où leur efficacité ne risque pas d'être indûment compromise aux vitesses d'exploitation normales.

D'autres mesures d'atténuation sont possibles. Ainsi, le Service des incendies de Calgary a effectué des essais pour évaluer le recours à des klaxons sirènes offrant une plus grande possibilité de diriger le signal [MC Squared, 1990]. Le niveau sonore mesuré dans un camion incendie équipé d'une sirène standard montée sur la barre de feux clignotants au-dessus de la cabine atteignait 98 à 100 dBA dans le siège du conducteur et 100 dBA à 50 pi en avant du véhicule. Le klaxon à rayonnement conformé installé au même endroit a permis de diminuer le niveau sonore de 12 dBA dans le siège du conducteur (portant le niveau sonore entre 86 et 88 dBA). En même temps, le niveau sonore à 50 pi en avant du véhicule augmentait, atteignant 110 dBA. Les essais mettaient en jeu un conformateur électronique, mais une autre solution

serait envisageable pour certaines locomotives. Il suffirait simplement, dans le cas des nouvelles locomotives, d'encastrer le klaxon dans le capot ou le toit. On consultera l'annexe F pour une analyse de l'effet sur la collectivité d'un tel dispositif hypothétique.

7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La présente section regroupe nos conclusions et recommandations. Pour ce qui est des recommandations touchant les caractéristiques des klaxons, nous laissons le soin aux compagnies de chemin de fer et à Transports Canada de décider lesquelles devraient être officialisées en tant que règles et lesquelles devraient être adoptées en tant que normes ferroviaires. Notre étude portait sur l'emplacement et les caractéristiques acoustiques des klaxons de locomotives. Bien sûr, il sera beaucoup plus facile d'appliquer les changements proposés aux locomotives des prochaines générations qu'il peut l'être aux locomotives existantes. C'est pourquoi la même conclusion peut mener à des recommandations différentes pour les locomotives nouvellement construites et les locomotives existantes.

Nous avons constaté que l'emplacement du klaxon sur la locomotive est un facteur extrêmement important de l'efficacité de celui-ci aux vitesses d'exploitation. Ainsi, si le klaxon n'est pas monté à l'avant de la locomotive, le niveau sonore en avant de la locomotive (et en particulier celui des composantes haute fréquence) se dégrade à mesure qu'augmente la vitesse du train. Les klaxons montés à l'avant se sont donc révélés plus efficaces que les klaxons montés à quelque autre endroit.

Nous avons conclu qu'il est possible de parer à l'élévation du niveau de bruit dans la cabine de conduite qu'engendrerait un klaxon monté à l'avant. Comment? Il faudra d'autres analyses et expériences pour déterminer la méthode optimale. Mais il existe déjà des méthodes à portée de la main : cette contrainte ne devrait donc pas compromettre la capacité de respecter la date butoir pour la réalisation des objectifs de *Direction 2006*, soit 2006. Nous croyons que les impératifs de sécurité auxquels répond le klaxon l'emportent sur les inconvénients que peut causer le port de protecteurs auditifs.

1. ***Nous recommandons que Transports Canada (qui est responsable à la fois de la sécurité du public et celle de l'équipe de conduite) adopte des règles qui stipulent que les klaxons de locomotive doivent être placés à l'endroit où leur efficacité ne peut être indûment compromise aux vitesses normales d'exploitation.***

Les coûts associés au positionnement des klaxons à l'avant et au respect des limites de bruit dans la cabine ne posent pas vraiment problème dans le cas des locomotives neuves.

2. ***Nous recommandons que toutes les locomotives neuves soient équipées d'un klaxon monté à l'avant. Dans le cas d'une locomotive dont le klaxon ne serait pas monté à l'avant, l'efficacité de celui-ci devrait être démontrée à la vitesse d'exploitation maximale de la locomotive.***
3. ***Le klaxon devrait être monté au niveau du toit, mais un klaxon à la hauteur du capot peut aussi être acceptable s'il en résulte un niveau de bruit moindre dans la collectivité et/ou dans la cabine de conduite.***

D'après nos constatations, la norme en vigueur, qui exige un niveau sonore de 96 dBA à 30,5 m, oblige souvent le conducteur de véhicule automobile à prendre des mesures de réduction du bruit et à tendre l'oreille pour percevoir un éventuel signal de klaxon. En effet, aucune des

publications consultées au cours de notre recherche documentaire ne faisait état d'un niveau sonore inférieur à 101 dBA à 30,5 m pour un klaxon, et nos propres mesures, prises à des angles latéraux à 30,5 m de la locomotive, n'ont jamais été inférieures à 108 dB. Presque tous les klaxons à 3 et à 5 cornets émettaient des signaux de 108 à 110 dB, atteignant même 115 dB dans certains cas. Pour ce qui est des klaxons à deux niveaux, le fabricant n'a pas été en mesure de fournir un klaxon émettant un son d'une puissance inférieure à 102 dBA à 30,5 m. Cela dit, nous ne voyons pas de raison de maintenir à 96 dBA le niveau sonore minimal.

- 4. Nous recommandons que toutes les locomotives capables d'atteindre des vitesses supérieures à 105 km/h (65 mi/h) soient équipées d'un klaxon pouvant être actionné par l'équipe de train, monté à l'avant et produisant un signal dont le niveau de pression acoustique atteint au moins 110 dBA à 30,5 m (100 pi). Si les règles d'exploitation ferroviaire devaient limiter l'utilisation de ce klaxon aux situations d'urgence, le klaxon normal devrait alors être monté sur la locomotive de manière à émettre un son équivalent d'au moins 100 dB à 30,5 m (100 pi), mesuré alors que la locomotive roule à sa pleine vitesse, à des angles variant de 25 à 45 degrés par rapport à l'avant.***

Si l'on conçoit que les trains de voyageurs qui atteignent des vitesses supérieures à 105 km/h (65 mi/h) puissent émettre des signaux de 111 à 115 dBA en cas d'urgence perçue, on pourrait envisager un niveau sonore de 107 à 111 dBA à 30,5 m (100 pi) pour les trains de marchandises dont la vitesse est inférieure à 105 km/h (65 mi/h). Nous hésitons toutefois à recommander une limite à la puissance acoustique d'un klaxon qui serait utilisé en cas d'urgence perçue.

- 5. Nous recommandons que les compagnies de chemin de fer dont les locomotives roulent fréquemment à 100 km/h (60 mi/h) adoptent le niveau sonore recommandé ci-dessus pour les locomotives grande vitesse, et que toutes les locomotives exploitées en voie principale à des vitesses inférieures à 105 km/h (65 mi/h) soient équipées d'un klaxon pouvant être actionné par l'équipe de train, monté à l'avant, produisant un niveau de pression acoustique d'au moins 106 dBA à 30,5 m (100 pi) et répondant aux conditions susmentionnées, s'il s'agit d'un klaxon réservé aux urgences.***

Les niveaux sonores recommandés ci-dessus ne sont pas plus élevés que ceux produits par les klaxons existants. Mais le fait de placer le klaxon à l'avant améliorera son efficacité et permettra même de diminuer quelque peu l'intensité du son émis. Quant au klaxon à deux niveaux sonores, il donnerait les avertissements réglementaires à un niveau sonore «bas» et comporterait aussi un niveau sonore «haut», actionné par l'équipe de train en cas d'urgence perçue.

- 6. Nous recommandons que les transporteurs ferroviaires dont les locomotives traversent fréquemment des zones urbaines où le sifflement des trains est permis envisagent l'utilisation de klaxons à deux niveaux sonores.***
- 7. Lorsque des klaxons à deux niveaux sonores sont utilisés, nous recommandons qu'en mode «bas», le niveau sonore équivalent soit d'au moins 100 dBA à 30,5 m (100 pi).***

Des limites maximales sont souhaitables pour atténuer la gêne due au bruit chez les piétons et dans les collectivités riveraines, mais celles-ci doivent s'appliquer aux bruits projetés sur le côté de la locomotive. Les klaxons ferroviaires existants ont une puissance maximale d'environ 145 dB à 1 m (3 pi), laquelle se dissipe jusqu'à environ 115 dB à 30,5 m (100 pi).

- 8. *Nous recommandons que des limites maximales ne soient définies que pour des angles latéraux par rapport à la locomotive, plutôt que pour des distances en avant de celle-ci.***
- 9. *Nous recommandons une limite maximale de 135 dB, mesurée en bordure de la voie au passage d'une locomotive roulant à 10 km/h, d'un point d'observation situé à 1,5 m au-dessus de la surface d'un quai réservé aux voyageurs et à 2,0 m, à l'horizontale, du rail le plus proche.***

Nous encourageons les sociétés ferroviaires du Canada à demander à la FRA de revoir sa limite maximale en ce qui a trait au niveau haut du klaxon à deux niveaux sonores, dans le cas des locomotives qui ne se rendent qu'occasionnellement aux États-Unis. La conciliation nécessaire entre les impératifs de sécurité et de diminution du bruit dans les collectivités riveraines peut justifier la mise en place de telles règles au moment où l'abolition du sifflement des trains sera levée, mais les klaxons à deux niveaux sonores devraient justement réduire l'utilisation du niveau haut.

- 10. *Nous recommandons que les sociétés ferroviaires canadiennes fassent les démarches nécessaires pour que les locomotives canadiennes qui sont exploitées aux États-Unis, et plus particulièrement les locomotives grande vitesse de VIA Rail, soient exemptées de la limite de 111 dB proposée pour le niveau haut des klaxons à deux niveaux, si la FRA persiste à imposer cette limite dans sa règle finale.***

Nous croyons que la technologie actuelle des klaxons à air comprimé permet de fabriquer des dispositifs d'avertissement sonore efficaces. La caractéristique la plus importante du signal est son spectre de fréquences, et le contenu en harmoniques du klaxon compte davantage que ses fréquences fondamentales. Selon les résultats de nos travaux, un klaxon à spectre étroit doit émettre un signal de 5 dB de plus qu'un klaxon à spectre large, pour produire le même niveau d'alerte à l'intérieur d'un véhicule. Un spectre large ajoute aussi à l'intensité et à l'urgence apparente de l'avertissement sonore. Nous avons en outre constaté que, les autres exigences étant satisfaites, la perte auditive reliée à l'âge n'a pas à être prise en compte dans la détermination du spectre du klaxon, et ne diminue pas vraiment l'importance du contenu hautes fréquences.

- 11. *Nous recommandons que le contenu en fréquences du son émis par le klaxon tel qu'assemblé et monté sur la locomotive, lorsque mesuré à 61 m lors d'essais statiques, soit tel que les SPL minimaux des bandes d'un tiers d'octave couvrant la gamme des 2 000 Hz à 3 150 Hz soient inférieurs d'au moins F aux SPL maximaux des bandes d'un tiers d'octave couvrant la gamme des 250 Hz à 1 250 Hz, où F est***

égal à 12 dB dans le cas des trains roulant à plus de 105 km/h, et à 15 dB, dans le cas des autres trains¹³.

Il y a lieu de définir plus clairement ce qui est présentement reconnu comme le son d'un klaxon de locomotive. Nous recommandons que les compagnies de chemin de fer et les constructeurs de locomotives s'inspirent, à cet égard, des normes du Royaume-Uni.

- 12. Nous recommandons que les sons produits par le dispositif d'avertissement sonore puissent être reconnus comme provenant d'un train et soient donc différents des sons émis par les dispositifs d'avertissement utilisés dans le transport routier, par les sirènes d'usine ou par tout autre dispositif d'avertissement courant.***
- 13. Nous recommandons que klaxons de locomotives comportent des fréquences fondamentales compatibles avec au moins deux cornets et que celles-ci soient comprises entre 250 Hz et 660 Hz.***
- 14. Nous recommandons que la tolérance de fréquence fondamentale soit fixée à 20 Hz et que les spécifications touchant le contenu en harmoniques fassent en sorte que le klaxon, une fois monté sur la locomotive, respecte les exigences relatives aux bandes d'un tiers d'octave énoncées plus haut.***

Si la fréquence idéale de 562 Hz établie par nos travaux de laboratoire est confirmée par un organisme indépendant, il faudrait modifier la première partie de la recommandation et préciser qu'au moins un cornet devrait avoir une fréquence fondamentale dans la gamme de 470 Hz à 512 Hz.

Comparativement aux klaxons à 3 cornets, les klaxons à 5 cornets ont un spectre plus large et ils accentuent quelque peu l'intensité et l'urgence apparente du signal. Mais cette légère supériorité des klaxons à 5 cornets ne nous paraît pas suffisante pour que nous recommandions d'en faire une norme pour toutes les locomotives. Mais si on pense à la puissance exigée d'un dispositif d'avertissement sonore à grande vitesse, le gain d'efficacité qu'ils offrent paraît justifié.

- 15. Nous recommandons que les compagnies de chemin de fer examinent les avantages des klaxons à 5 cornets au moment de l'achat de locomotives destinées à rouler sur des voies principales.***
- 16. Nous recommandons que toutes les locomotives, existantes ou futures, pratiquant des vitesses supérieures à 105 km/h soient équipées d'un klaxon à 5 cornets monté à l'avant, que peut actionner l'équipe de train en cas d'urgence.***

Nous insistons sur l'importance de choisir les combinaisons de fréquences et de préciser le contenu en harmoniques au moment de l'achat des klaxons, et d'intervenir sur les klaxons à 3 cornets, lors de leur remise à neuf, de façon qu'ils produisent un signal d'avertissement à large spectre.

¹³ Cette recommandation pourrait nécessiter de la part des compagnies de chemin de fer qu'elles procèdent à des essais acoustiques et qu'elles profitent de la remise à neuf de leurs klaxons pour non seulement remettre en état les diaphragmes mais aussi, éventuellement, reprofiler le spectre des cornets.

Les résultats de nos travaux révèlent une certaine augmentation de l'urgence apparente du signal avec un accroissement de la dissonance. Toutefois, la dissonance n'est pas un facteur aussi puissant que la fréquence, et son effet n'a pas pu être isolé statistiquement de celui du nombre de cornets.

17. Nous recommandons que les compagnies de chemin de fer qui adoptent un klaxon à deux niveaux sonores ou un klaxon réservé aux urgences choisissent une combinaison de fréquences telle que le niveau d'intensité supérieure (d'urgence) comporte une certaine dissonance.

Nous ne croyons pas que cette recommandation doive être intégrée à une règle. Nous ne jugeons d'ailleurs pas souhaitable d'appliquer cette recommandation aux klaxons ordinaires, utilisés fréquemment pour des signaux d'avertissement réglementaires.

D'autres facteurs entrent en jeu lorsqu'on examine les locomotives existantes à la lumière des résultats évoqués ci-dessus. Ainsi, au nombre des klaxons existants montés en milieu de locomotive, ceux qui sont situés tout juste derrière l'échappement du moteur sont beaucoup moins efficaces que les klaxons disposés à quelque autre endroit. Un klaxon monté à cet emplacement ne donnerait pas un avertissement efficace aux conducteurs de véhicules s'approchant d'un passage à niveau à 60 km/h, lorsque le train se déplace à 97 km/h (60 mi/h). De plus, peu de conducteurs immobilisés au passage à niveau seraient mis en alerte par ce klaxon, dans le cas d'un train roulant à plus de 47 km/h (30 mi/h). Nous avons constaté que même si les klaxons situés derrière la cheminée d'échappement pouvaient être entendus par un piéton prudent à temps pour qu'il puisse réagir, l'avertissement manquait quand même d'efficacité. En effet, une personne moins prudente pourrait ne pas penser que le son provient d'un train proche et percevrait donc moins l'urgence de la situation que si le même klaxon était monté à l'avant. Nous croyons que la réduction de l'aire d'avertissement couverte par les klaxons situés juste derrière l'échappement est suffisante pour justifier une action immédiate.

18. Nous recommandons, pour les locomotives grande vitesse existantes équipées d'un klaxon monté juste derrière l'échappement, que ce klaxon soit déplacé vers l'avant ou qu'un deuxième klaxon à utiliser en cas d'urgence soit installé à l'avant. Si les règles d'exploitation ferroviaire stipulent que ce deuxième klaxon ne doit être utilisé qu'en cas d'urgence, le klaxon dit normal doit alors être placé sur la locomotive à un endroit tel qu'il produise un niveau sonore équivalent d'au moins 100 dBA à 30,5 m (100 pi), à des angles de 25 à 45 degrés par rapport à l'avant de la locomotive, lorsque mesuré à la pleine vitesse d'exploitation de la locomotive.

Nous soumettons aux exploitants ferroviaires un certain nombre de solutions de rechange, qu'ils pourront évaluer en fonction de leur situation propre. Une de ces solutions est un klaxon réservé aux situations d'urgence (que le mécanicien actionne uniquement en cas d'urgence perçue). Il se pourrait qu'il faille combiner ce klaxon d'urgence à un ou même deux klaxons *normaux*, montés sur le côté, pour obtenir la couverture latérale accrue recommandée ci-dessus. Un klaxon à deux niveaux sonores constitue une autre solution, qui comporte des avantages distinctifs pour les trains exploités dans des zones où il convient de minimiser la gêne due au bruit. L'avertissement normal aurait un niveau sonore plus faible que le klaxon existant, mais comme il serait placé à

l'avant, il produirait un son plus fort et un avertissement plus efficace en avant de la locomotive, là où «ça compte». Quant au niveau sonore «haut», il serait réservé aux situations d'urgence perçue. Étendre la règle du mode «haut» au franchissement à grande vitesse de passages à niveau non automatisés accroîtrait la sécurité, mais il faudrait que ce gain de sécurité justifie la hausse du niveau de bruit qui s'ensuivrait dans la cabine. Cette règle pourrait s'avérer intéressante dans le cas d'un train de banlieue qui rencontre peu de passages à niveau non automatisés sur sa route; mais tel n'est pas nécessairement le cas pour un réseau interurbain, où les passages à niveau non automatisés sont fréquents. Enfin, déplacer le klaxon vers l'avant en améliorant l'insonorisation de la cabine et/ou en fournissant des protecteurs auditifs à l'équipe de conduite constitue une troisième solution possible.

Pour ce qui est des klaxons situés derrière l'échappement, les points de mesure sont suffisamment nombreux et les performances enregistrées suffisamment mauvaises pour que l'on puisse formuler des conclusions et recommandations solides. Les klaxons situés en milieu de locomotive, mais à une certaine distance de l'échappement, sont moins efficaces que les klaxons montés à l'avant, mais plus que ceux montés directement derrière l'échappement. D'après nos constatations, aucun emplacement ne permet d'obtenir un avertissement aussi efficace que l'avant de la locomotive. Nous disposons de trop peu de données sur le type et la fréquence des accidents pour pouvoir mesurer l'effet de l'aire d'avertissement réduite associée aux klaxons situés en milieu de locomotive (emplacement du klaxon sur la plupart des locomotives récentes). Nous pouvons toutefois affirmer que l'ajout, à l'avant de ces locomotives, d'un klaxon réservé aux urgences n'aurait pas d'effet marquant sur les niveaux de bruit à l'intérieur de la cabine. C'est pourquoi nous incitons les compagnies de chemin de fer à envisager l'ajout d'un tel klaxon.

19. Nous recommandons que les compagnies de chemin de fer exploitant des locomotives équipées de klaxons montés en milieu de locomotive, mais non directement derrière l'échappement, envisagent la possibilité d'installer à l'avant de la locomotive un deuxième klaxon, réservé aux urgences.

Il nous semble que les hauteurs libres accrues ménagées sur de nombreuses voies principales pour permettre le passage de porte-conteneurs à deux niveaux et de wagons porte-automobiles à trois niveaux permettraient de surélever les klaxons en milieu de locomotive jusqu'à une hauteur où leur efficacité d'avertissement serait comparable à celles des klaxons montés à l'avant. Nous n'avons pas pu mener d'essais pour déterminer à quelle hauteur il faut élever le klaxon pour obtenir la même performance qu'avec un klaxon monté à l'avant. De plus, nos essais ont été réalisés en service payant plutôt que dans des conditions contrôlées. Il serait intéressant pour les compagnies de chemin de fer qu'elles valident nos données par des essais dans des conditions contrôlées. De plus, elles pourraient évaluer, pour un éventail de vitesses de locomotive, à quelle hauteur un klaxon doit être haussé au-dessus du profil du toit pour produire un signal d'avertissement vers l'avant qui ne soit pas atténué aux vitesses d'exploitation.

Les dispositifs d'avertissement sonore ne sont pas une panacée, comme nous l'avons constaté. Ainsi, il est impossible pour des trains rapides de donner un délai d'avertissement suffisant à certains véhicules de grande longueur immobilisés aux passages à niveau.

- 20. Nous recommandons que Transports Canada insiste, lors de la promotion de programmes de formation destinés aux conducteurs de véhicules routiers, sur la nécessité de baisser les deux vitres et de couper toutes les sources de bruit pour pouvoir entendre un train s'approchant d'un passage à niveau, dans des conditions de mauvaise visibilité.**
- 21. Nous recommandons que Transports Canada conseille également aux autorités provinciales et municipales d'empêcher les autobus scolaires et les ensembles tracteur-remorque de traverser les passages à niveau non automatisés fréquentés par des trains grande vitesse quand la visibilité est réduite (p. ex., brouillard, forte chute de neige).**

Nous préconisons que de telles mesures soient prises notamment au passage à niveau de Mowbray Road, dans la subdivision de Kingston, Ontario, qui n'est protégé que par un panneau d'arrêt sur une voie où les trains circulent à 160 km/h.

Encore une fois, les exigences posées par les passages à niveau non automatisés où tant les trains que les véhicules routiers circulent à grande vitesse dépassent les limites des dispositifs d'avertissement sonore.

- 22. Nous recommandons que la limite de vitesse des véhicules routiers aux passages à niveau non automatisés soit fixée à au plus 60 km/h, lorsque la route est en gravier.**
- 23. Nous recommandons que des recherches soient menées sur la possibilité d'équiper tous les passages à niveau non automatisés de panneaux d'avertissement indiquant de réduire la vitesse à 60 km/h sur chaussée humide et par visibilité réduite.**

Nous croyons qu'il est possible de réduire la gêne due au bruit pour les collectivités riveraines sans compromettre indûment l'efficacité d'avertissement. Une façon d'y arriver est le recours à un klaxon à deux niveaux sonores, qui fait l'objet d'une recommandation ci-dessus. Une autre façon est de délaissier la *distance* d'avertissement fixe actuellement utilisée au profit d'un *délai* d'avertissement fixe.

- 24. Nous recommandons que les chemins de fer modifient leur règle d'exploitation 14(L)(ii) de manière à laisser aux mécaniciens une plus grande souplesse lorsqu'ils actionnent les klaxons aux passages à niveau assujettis à la règle du sifflement, de façon que le sifflement commence à 15 secondes du passage à niveau.**

Les mécaniciens doivent être incités à donner le premier coup de klaxon à un endroit qu'ils jugent se trouver à 15 s du passage à niveau, ou au poteau commandant de siffler, si leur vitesse dépasse 100 km/h (60 mi/h). Aux passages à niveau où la limite permanente de vitesse en voie est de 65 km/h (40 mi/h) ou moins, le poteau commandant de siffler devrait se trouver à une distance permettant un avertissement de 15 s au premier coup de klaxon émis par un train se déplaçant à la vitesse maximale permise.

De plus, l'avertissement a beaucoup moins de valeur à la fin de la séquence d'avertissement.

25. Nous recommandons que les mécaniciens de locomotive aient la possibilité d'arrêter le klaxon à l'entrée de passages à niveau protégés par des barrières (plutôt qu'à la sortie), lorsque plusieurs véhicules sont déjà immobilisés devant les barrières.

Nous disposons de suffisamment de données sur la piètre efficacité des klaxons placés derrière l'échappement pour recommander une intervention immédiate sur cette question. En supposant que les recommandations du présent rapport soient acceptées, la première chose à faire est d'en diffuser les résultats à grande échelle. Dans certains cas, ce travail de diffusion a déjà commencé. Les Travailleurs unis des transports (autrefois la *Brotherhood of Locomotive Engineers*) devront avoir voix au chapitre dans toute solution susceptible d'entraîner une hausse du niveau de bruit dans la cabine de conduite. VIA Rail a entamé des discussions avec ses employés sur les enjeux que représentent pour eux l'efficacité des klaxons, et les équipes de train ont été invitées à se prononcer sur certains aspects des nouveaux klaxons installés sur les locomotives de VIA et de WCE. La société a pris sur elle d'informer ses employés des questions de sécurité en jeu et des mesures d'atténuation du bruit à leur portée.

Des enquêtes sur l'efficacité de l'avertissement des nouveaux klaxons mis à l'essai et sur les répercussions de ceux-ci sur la vie à bord ont été menées auprès des membres des équipes de train. Ils étaient notamment invités à se prononcer sur le type d'actionneur dont il conviendrait de doter les klaxons à deux niveaux sonores et sur l'opportunité d'asservir l'actionneur du niveau «fort» du klaxon à l'actionneur du frein d'urgence. Malheureusement, en raison du calendrier de l'étude et des retards à installer les systèmes, peu de réponses ont été reçues à ce jour.

26. Nous recommandons que les compagnies de chemin de fer participantes conservent les questionnaires du sondage ainsi que le matériel de surveillance vidéo même après l'achèvement de la présente étude, de manière à aider les transporteurs à évaluer la réaction et la perception de leurs équipes vis-à-vis des nouvelles options en matière de klaxons.

Deux aspects du klaxon d'urgence doivent être étudiés plus avant. Les discussions tenues par VIA Rail et WCE avec leurs mécaniciens de locomotives ont confirmé la préférence pour un seul bouton de klaxon, à deux intensités. Or, le seul type de bouton à deux intensités dont nous disposons ne permettait pas de bien distinguer entre le premier niveau et le deuxième. Le mécanicien devait apprendre jusqu'où il pouvait enfoncer le bouton sans actionner un signal d'urgence. Un bouton amélioré et d'autres essais en service s'imposent donc.

Le questionnaire du sondage invitait également les mécaniciens à s'exprimer sur l'opportunité de lier l'activation du niveau d'urgence du klaxon à l'application du frein d'urgence. Mais ce sont les discussions des compagnies de chemin de fer avec leurs employés qui ont le mieux permis de faire le point sur la question. Nous avons ainsi appris qu'il arrive que le frein d'urgence soit appliqué à contretemps, et que les mécaniciens appliquent le frein d'urgence dans des situations où il n'est pas nécessaire d'actionner le klaxon. Si l'on opte pour un klaxon actionné automatiquement à l'application des freins, celui-ci devrait être relié au levier de frein et le mécanicien devrait pouvoir en recouvrer la commande (l'arrêter ou en modifier la cadence) en appuyant sur le bouton de klaxon.

Les locomotives «converties» aux nouvelles options peuvent être utilisées pour recueillir les commentaires des intéressés sur ces klaxons, et pour résoudre les problèmes qui font obstacle à leur acceptation. Les constructeurs et fabricants disposeront ainsi d'une mine d'informations pour la conception des klaxons et la détermination de leur emplacement sur les prochaines générations de locomotives. Quant aux transporteurs ferroviaires et à leurs syndicats, ils seront mieux à même d'apprécier la nécessité et/ou les façons de déplacer les klaxons sur d'autres locomotives plus performantes.

Les résultats de la présente étude doivent être diffusés au delà du cercle des participants.

27. Nous recommandons que des exposés soient présentés aux constructeurs de locomotives, aux compagnies de chemin de fer qui ne participent pas directement à l'étude et à tous les syndicats qui en feront la demande. Nous recommandons également que soit créé un site Web où le public pourrait consulter les données audio-visuelles.

Certains sujets d'intérêt ont été mis au jour au cours des présents travaux, et pourront faire l'objet d'autres études.

28. Nous recommandons que Transports Canada suive de près les travaux de la FRA sur les feux clignotants par rapport aux feux continus. Il pourrait être intéressant, en outre, de soumettre les données américaines sur les accidents aux passages à niveau à une analyse chronologique de type avant/après, pour étudier l'effet des feux à éclats et des phares de fossé, et pour évaluer la visibilité relative de différents feux dans la brume.

29. Nous recommandons que les études américaines sur les incidences de l'abolition du sifflement des trains soient l'objet d'autres analyses, de façon que soient mieux connus les facteurs influant sur l'efficacité des klaxons de locomotives.

La présente étude portait avant tout sur l'aspect sécurité de la performance des klaxons. Le Comité directeur a d'ailleurs recommandé que soit reportée à plus tard une évaluation plus rigoureuse des effets sur les collectivités riveraines et des solutions possibles. Or, l'étude des effets sur les collectivités peut être menée sur plusieurs fronts :

- élaboration d'une meilleure base de données sur la densité résidentielle à proximité des passages à niveau;
- élaboration d'une politique sur la manière d'appliquer le principe du coût social;
- évaluation de la performance des klaxons en bordure de voie;
- projets en cours de mise en œuvre et d'évaluation de klaxons à deux niveaux sonores.

D'autres questions suscitées par la présente étude méritent que l'on s'y arrête plus longuement :

- validation de la fréquence idéale de 562 Hz;
- étude des conditions dans lesquelles les basses fréquences sont particulièrement efficaces;
- détermination du rapport entre l'urgence perçue et le temps de réaction dans les milieux sonores caractéristiques de l'intérieur des véhicules;

- meilleure caractérisation des effets de la réfraction et de la turbulence de l'air (et de leur limite d'influence) sur les dispositifs d'avertissement sonore équipant les véhicules en mouvement.

La présente étude a été lancée par les chemins de fer canadiens et Transports Canada en marge de *Direction 2006*. Nous croyons que l'application des recommandations ci-dessus d'ici le 1^{er} janvier 2006 contribuera à l'atteinte de l'objectif de cette initiative, qui est de réduire de moitié le nombre d'accidents aux passages à niveau d'ici 2006.

RÉFÉRENCES

- Abrams, D.S., and B.M. Lipscomb, "Visual and Auditory Correlates in Grade Crossing Safety", *Proceedings of the Fourth International Symposium on Railroad-Highway Grade Crossing Research and Safety*, J.M. Wilbur, D.L. Donahue (eds.), October 1996.
- Airchime Manufacturing Ltd., *Railroad Whistles*, Bulletin WH-85, Airchime Manufacturing Ltd., Langley, B.C., 1985.
- American National Standards Institute, *Method of the Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere*, ANSI S1.26-1978, Acoustical Society of America, 1978.
- Aurelius, John, and Norman Korobow, *The Visibility and Audibility of Trains Approaching Rail + Highway Grade Crossings*, Federal Railroad Administration, FRA-RP-71-1, May 1971.
- Beauchemin-Beaton-LaPointe Inc., *Study to Define the Requirements for Railway Level Crossing Protection Acceptable for Train Operations up to 125 mph, Task 105, Highway Signalization Techniques*. Transport Canada, January, 1978.
- Bureau de la sécurité des transports du Canada, *Blessures mortelles à une intruse, VIA Rail Canada Inc., Train numéro 76, Point milliaire 98,65, subdivision Chatham, Tecumseh, Ontario, Rapport d'enquête sur accident ferroviaire numéro R96S0106*, 12 juillet 1996.
- Byrne, David C., and Dennis P. Driscoll, "Acoustical Considerations for Effective Emergency Alarm Systems in an Industrial Setting Part One", *CAOHC Update*, 9 (3), Fall 1998.
- Caelli, T., and D. Porter, "On Difficulties in Localizing Ambulance Sirens", *Human Factors*, 22 (6), 719-724, 1980.
- Carroll, Anya A., Jordan Multer, and Stephanie H. Markos, *Safety of Highway-Railroad Grade Crossings: Use of Auxiliary External Alerting Devices to Improve Locomotive Conspicuity*, DOT-VNTSC-FRA-95-10, July 1995.
- Corliss E.L.R., and F.E. Jones, "Method for estimating the audibility and effective loudness of sirens and speech in automobiles", *Journal of the Acoustic Society of America*, 60: 1126-1131, 1976.
- Daigle, G.A., "Effects of atmospheric turbulence on the interference of sound waves above a finite impedance boundary", *Journal of the Acoustic Society of America*, 65 (1), 45-49, January 1979.
- Développement des ressources humaines Canada, Unité des services techniques, Direction générale du travail, *Exposition au bruit et aux émissions provenant des moteurs diesel à bord des locomotives* (deux volumes), 2000.
- Edwards, R.G., A.B. Broaderson, W.W. Green, and B.L. Lempert, "A Second Study of the Effectiveness of Earplugs as Worn in the Workplace", *Noise Control Engineering Journal*, 20, 6-15, 1983.
- Edworthy, J., S. Loxley, and I. Dennis, "Improving Auditory Warning Design: Relationship between Warning Sound Parameters and Perceived Urgency", *Human Factors*, 33 (2), 205-231, 1991.
- English, G.W., C. Schwier, R.W. Lake et R. Barton, *L'internalisation des coûts sociaux du secteur des transports*, Transports Canada, Ottawa, décembre 2000.
- Fann, M., "Examination of 49CFR Part 229.129 Measurement Errors for Mid Body Locomotive Horn Placements", *Noise-Con 2001 Proceedings*, Institute of Noise Control Engineering, 2001.
- Federal Register, 49 CFR Parts 222 and 229, *Use of Locomotive Horns at Highway-Rail Grade Crossings Proposed Rule*, Vol. 65, No. 9, Thursday, January 13, 2000.

- Fidell, S., "Effectiveness of Audible Warning Signals for Emergency Vehicles", *Human Factors*, 20, (1), 19-26, 1978.
- Fidell, S., and S. Teffeteller, "Scaling the Annoyance of Intrusive Sounds", *Journal of Sound and Vibration*, 78 (2), 291-298, 1981.
- Green, D.M., and J.A. Swets, *Signal Detection Theory and Psychophysics*, John Wiley and Sons Inc, 1966.
- Haas, E.C., and J. Edworthy, "Designing urgency into auditory warnings using pitch, speed, and loudness", *Computing & Control Engineering Journal*, 7 (4), 193-198, 1996.
- Johansson, G., and K. Rumar, "Drivers' Brake Reaction Times", *Human Factors*, 13, 23-27, 1971.
- Keller, Amanda S., and Edward J. Rickley, *The Safety of Highway-Railroad Grade Crossings: Study of the Acoustic Characteristics of Railroad Horn Systems*, DOT-VNTSC-FRA-93-1, July 1993.
- Lamancousa, J.S., *Noise Control*, Pennsylvania State University, 2000.
- Laroche, C., H. Tram Quoc, R. Hetu, and S. McDuff, "Detectsound: A Computerized Model for Predicting the Detectability of Warning Signals in Noisy Workplaces", *Applied Acoustics* 32, 193-214, 1991.
- Lucke, Roy, and Richard Raub, *Assessment of Railroad Train Horn Noise in Mundelein Residential Neighborhoods: Initial Findings*, Interim Report, Northwest University, April 2002.
- Matsubara, S., F. Furihata, and T. Yanagisawa, *Electroacoustic Transducers of Earplug Type for Active Noise Control in External Auditory Canal*, Department of Electrical and Electronics Engineering, Shinshu University, Nagano, Japan, 1999.
- MC Squared Systems Design Group, "Loudspeaker Directivity and Vehicle Siren Sound Levels", *Fire Engineering Magazine*, November 1990.
- Moore, B.C.J., R.W. Peters, and B.R. Glasberg, "Auditory Filter Shapes at Low Center Frequencies", *Journal of the Acoustic Society of America*, 88(1), pp 132-140, July, 1990.
- Multer, J., and A. Rapoza, *Field Evaluation of a Wayside Horn at a Highway-Railroad Grade Crossing*, DOT-VNTSC-FRA-97-1, June 1998.
- Najm, W., M. Mironer, J. Koziol, J. Wang, and R. Knipling, *Synthesis Report: Examination of Target Vehicular crashes and potential ITS countermeasures*, US DOT VNTSC-NHTSA-95-4, Volpe Center, 1995.
- National Transportation Safety Board, *Passenger/commuter train and motor vehicle collisions at grade crossings (1985)*. Safety Study NTSB/SS-86/04. Washington, DC, 1986.
- National Transportation Safety Board, *Safety Study of Passive Crossings*, Washington, DC, 1998.
- National Transportation Safety Board, *Letter of Comment to FRA's Docket Number FRA-1999-6439-2347*, Washington, DC, October 2000.
- Nober, E., A. Pierce, and A. Well, *Waking Effectiveness of Household Smoke and Fire Detection Devices*, National Bureau of Standards, Washington, DC, 1983.
- Olson, P., and M. Sivak, "Perception-response time to unexpected roadway hazards", *Human Factors*, 28, 91-96, 1986.
- Organisation internationale de normalisation (ISO), *Acoustique – Seuil normal d'audition par conduction aérienne en fonction de l'âge et du sexe pour les personnes otologiquement normales*, norme 7029-1984, 1984.

- Organisation internationale de normalisation (ISO), *Signaux de danger pour les lieux de travail – Signaux auditifs*, norme 7731-1986, 1986.
- Patterson, Roy D., and Ian Nimmo-Smith, “Off-Frequency Listening and Auditory-Filter Asymmetry”, *Journal of the Acoustic Society of America*, 67 (1), January 1980.
- Patterson, R.D., I. Nimmo-Smith, D.L. Weber, and R. Milroy, “The Deterioration of Hearing with Age: Frequency Selectivity, the Critical Ratio the Audiogram and Speech Threshold”, *Journal of the Acoustic Society of America*, 72, 1788-1803, 1982.
- Queensland Railways, “Rollingstock Engineering Section”, *Safety Equipment Specification*, Reference No. MRE.9606A, Australia, 1997.
- Rapoza, Amanda S., Thomas G. Raslear, and Edward J. Rickley, *Railroad Horn Systems Research*, DOT-VNTSC-FRA-98-2, January 1999.
- Rapoza, A.S., and G.G. Fleming, “The Effect of Installation Location on Railroad Horn Sound Levels”, *Proceedings: Noise-Con 2001*, Institute of Noise Control Engineering, 2001.
- Robinson and Dadson [1956] see ISO Standard 226 or Pohlmann, K. C., *Principles of Digital Audio*, McGraw-Hill, New York, 360, 1995.
- Robinson, Gary S., and John G. Casali, “Audibility of Reverse Alarms Under Hearing Protectors and its Prediction for Normal and Hearing-Impaired Listeners”, *Human Factors in Auditory Warnings*, Neville A. Stanton, Judy Edworthy (eds.), Ashgate Publishing Ltd., 1999.
- Rudnick, I., “The propagation of an acoustic wave along a boundary,” *Journal of the Acoustics Society of America*, 19 (2), 348-356, 1947.
- Seshagiri, B., and B. Stewart, *The Audibility of Locomotive Horns in the Presence of Background Noise*, Labour Canada, 1991.
- Seshagiri, B., and B. Stewart, “Investigation of the Audibility of Locomotive Horns”, *Journal of the American Industrial Hygiene Association*, 53, November 1992.
- Skeiber, S.C., R.L. Mason, and R.C. Potter, *Effectiveness of Audible Devices on Emergency Vehicles*, US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, DOT-TSC-OST-77-38, Washington, DC, 1977.
- Skeiber, Stanley C., R.L. Mason, and R.C. Potter, “Effectiveness of audible warning devices on emergency vehicles”, *Sound and Vibration*, 14-22, February 1978.
- Slaney, Malcolm, *Lyon’s Cochlear Model*, Apple Technical Report Number 13, Apple Computer Inc., 1988.
- Transports Canada, Direction générale de la sécurité ferroviaire, *Incidences de l’abolition du sifflement des trains sur la sécurité aux passages à niveau*, TP 12682, Ottawa, Ontario, 1995.
- U.K. Railway Group, *Visibility and Audibility of Trains on Track*, Railway Group Standard GM/RT 2180, 1995.
- University of Central Florida, Noise Laboratory, *Comprehensive Community Noise Model User’s Manual*, 2002.
- U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Office of Safety, *Florida’s Train Whistle Ban*, Washington, DC, 1990.
- U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, *Nationwide Study of Train Whistle Bans*, Washington, DC, 1995.

- U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, *Draft Environmental Impact Statement, Proposed Rule for the Use of Locomotive Horns at Highway-Rail Grade Crossings*, Washington, DC, December 1999.
- U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, *Updated Analysis of Train Whistle Bans*, Washington, DC, 2000.
- Wilson, D. *A Study of Sound Level of Train Horns Measured Inside Selected Vehicle Types*, Unpublished Master's Thesis, University of Tennessee, Knoxville, December 1983.
- Zwicker, E., and B. Scharf, "A model of loudness summation", *Psychological Review*, 72, 3-26, 1965.
- Zwicker, E., and H. Fastl, *Psychoacoustics – Facts and Models*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1990.

ANNEXE A

**Avis de projet de règle sur les klaxons de locomotives émis
par la Federal Railroad Administration des États-Unis**

**Source : *Federal Register*, vol. 65, n° 9, jeudi 13 janvier 2000
(extraits)**

[TRADUCTION)

(...) la plupart du temps, quelle que soit la configuration du passage à niveau et la vitesse du train, un klaxon de train réglé pour émettre un son de 104 à 105 dB(A) à 100 pieds en avant de la locomotive fournit un signal sonore suffisant pour avertir l'automobiliste immobilisé au passage à niveau de l'arrivée imminente du train, lorsque ce passage à niveau est doté d'une signalisation active.

La situation se complique lorsque le passage à niveau est doté d'une signalisation passive. Selon les harmoniques du klaxon du train, le Volpe Center estime qu'un niveau sonore de 111 à 114 dB(A) pourrait être suffisant pour avertir la plupart des automobilistes à des passages à niveau dotés d'une signalisation passive, pour toutes les vitesses de trains conventionnels, même s'il faut un écart plus important entre le niveau sonore du signal du klaxon tel que perçu dans le véhicule (après la perte d'insertion) et celui du bruit de fond qu'aux passages à niveau dotés de dispositifs d'avertissement automatisés pour attirer l'attention des automobilistes.

Les effets sur les collectivités riveraines sont également très sensibles au niveau sonore des klaxons de train – mais en sens opposé. Les calculs du Volpe Center donnent à penser, par exemple, qu'il suffirait de faire passer de 114 dB(A) à 111 dB(A) le niveau sonore permissible du klaxon pour doubler le nombre de mouvements de train permis avant qu'une valeur couramment acceptée des niveaux sonores émis dans la collectivité pendant une période de 24 heures ($L_{dn}=65$ dB(A)) soit dépassée, à n'importe quelle distance de l'emprise ferroviaire.

La FRA propose deux options bien précises et en soumet une troisième pour commentaires. En vertu des deux options proposées, le niveau sonore minimal demeurerait inchangé à 96 dB(A). Mais, pour empêcher toute baisse importante de l'efficacité d'avertissement, l'écart «en plus ou en moins» actuellement admis lors des essais sur le terrain serait aboli. Ainsi, ces essais devraient démontrer la capacité du klaxon d'émettre un niveau sonore d'au moins 96 dB(A) à 100 pieds en avant de la locomotive, sans dépasser un certain niveau maximal. Pour éviter que des conditions environnementales extrêmes compromettent les résultats, il y aurait lieu d'exiger que les essais aient lieu à une température comprise entre 36 et 95 degrés Fahrenheit, avec une humidité relative de 20 p. 100 à 90 p. 100. Car la température et l'humidité influent sur la propagation des ondes sonores.

Options d'un niveau sonore maximal. La première de ces options prévoit un niveau sonore maximal de 104 dB(A) pour le klaxon de train, niveau qui devrait être suffisant dans la plupart des situations pour fournir un avertissement adéquat aux passages à niveau dotés de dispositifs d'avertissement automatisés (où l'automobiliste, au point de décision, est immobilisé près du passage à niveau et s'attend à ce que le train arrive).

La deuxième option de niveau sonore maximal prévoit que le klaxon de train puisse émettre un signal allant jusqu'à 111 dB(A), niveau qui, croit-on, garantirait l'efficacité du klaxon dans beaucoup de situations aux passages à niveau non automatisés (où le véhicule automobile est en mouvement au point de décision et où aucun indice ne laisse croire à l'automobiliste qu'un train arrive). Dès que seront terminées les études du Volpe Center susceptibles de contenir de l'information pertinente sur ce sujet, la FRA les versera au registre.

Option d'un niveau sonore variable. Selon la FRA, une des façons de pallier ce problème des deux types de passage à niveau est le klaxon à niveau sonore variable. Ce klaxon pourrait émettre un son faible (p. ex., de 96 à 104 dB(A)) à l'approche d'un passage à niveau doté de dispositifs d'avertissement actifs, et un son élevé (p. ex., de 104 à 111 dB(A)) à l'approche d'un passage à niveau non équipé de systèmes d'avertissement automatisés. La FRA note toutefois que cette option risque d'alourdir la tâche du mécanicien et qu'elle pourrait être irréalisable là où les passages à niveau se suivent de façon rapprochée et ne sont pas uniformément dotés de dispositifs d'avertissement automatisés. Il y aurait donc lieu, dans ces circonstances, d'établir à tout le moins des procédures simplifiées exigeant du mécanicien qu'il prenne la décision la plus sûre. Les commentateurs sont invités à se prononcer sur cette approche en tant que troisième option.

Directionnalité. En vertu de la réglementation en vigueur, certains klaxons de locomotive ont été montés près du centre de la locomotive afin de réduire le niveau d'exposition au bruit de l'équipe de train. Même s'ils produisent un son d'au moins 96 dB(A) à 100 pieds en avant de la locomotive, les klaxons ainsi disposés ont parfois entraîné des niveaux sonores plus élevés perpendiculairement à la locomotive qu'en avant ou en arrière de celle-ci. Cela est dû à la présence d'obstacles (cheminées d'échappement ou appareils de conditionnement d'air) qui entraînent la dispersion du son. Selon la FRA, cette solution de déplacer le klaxon vers l'arrière ne peut se justifier par la nécessité d'assurer la sécurité de l'équipe de train; et elle amène les transporteurs ferroviaires à trahir leur engagement à limiter la gêne due au bruit dans les collectivités. Le projet de règle exige donc que les niveaux sonores mesurés à un angle de 90 degrés par rapport à la locomotive et à une distance de 100 pieds de son centre ne dépassent pas la valeur mesurée à 100 pieds en avant de celle-ci. La FRA aimerait également recevoir des commentaires sur la question suivante : est-il préférable de mesurer le niveau d'exposition au bruit dans la collectivité à 90 degrés par rapport à l'emplacement du klaxon ou par rapport au centre de la locomotive?

ANNEXE B

Klaxons en bordure de voie

Les systèmes dits «en bordure de voie» mis à l'essai jusqu'à maintenant sont des klaxons électroniques montés au passage à niveau. Ces dispositifs simulent le son émis par le klaxon d'une locomotive et ils sont recouverts/munis d'écrans de façon telle que le son est projeté vers la route plutôt que vers la voie (figure B.1). Ces klaxons sont actionnés par le système de signalisation du passage à niveau et ils comprennent un feu à éclats qui indique à l'équipe de train que le klaxon s'est déclenché.

Comme ces dispositifs sont présentement à l'essai aux États-Unis, le Comité directeur du projet a estimé qu'il valait mieux concentrer la présente étude sur les systèmes embarqués. L'intérêt que suscitent les klaxons en bordure de voie aux États-Unis vient principalement du fait que les collectivités sont à la recherche de solutions pour amortir l'effet de la levée prochaine de l'abolition du sifflement des trains, dont elles bénéficient actuellement, avec l'entrée en vigueur de la nouvelle réglementation de la FRA. Or, Transports Canada ne propose pas, pour sa part, de réinstaurer le sifflement des trains là où il a été aboli au Canada. Le Ministère s'intéresse plutôt aux améliorations qui pourraient être apportées aux systèmes embarqués, car il songe à modifier les règles sur les klaxons de locomotives.

Même si notre étude exclut les klaxons en bordure de voie, il nous apparaît pertinent de nous prononcer sur deux aspects des travaux réalisés à ce jour sur ces klaxons.

Une des lacunes des études sur les klaxons en bordure de voie menées jusqu'ici, c'est qu'elles portent toutes sur des dispositifs à faible intensité sonore. Ces dispositifs étaient mieux acceptés par les collectivités, certes, mais il n'a pas été clairement défini dans quelle mesure cette acceptation était due au fait que le son était orienté vers l'approche routière, à la faible intensité du son émis et/ou au spectre de fréquences différent.

En raison de leur intensité acoustique plus faible que celle des klaxons de locomotives et de leur spectre de fréquences plus étroit, les klaxons en bordure de voie mis à l'essai (figure B.2) ont été jugés par certains comme étant moins efficaces pour alerter les conducteurs. Rapoza et Rickley (1995) ont déterminé, à l'aide de données acoustiques, qu'un klaxon en bordure de voie produisant une seule hauteur tonale et un niveau sonore d'au plus 87 dBA serait moins détectable à l'intérieur d'un véhicule automobile en mouvement que des klaxons de locomotives à air comprimé à 5 et à 3 cornets produisant différentes hauteurs tonales.

Selon des évaluations récentes menées par la FRA (Rapoza et coll., 1999, p. 35), les klaxons en bordure de voie (du type caractérisé précédemment) ne pourraient alerter les conducteurs qui s'approcheraient à des vitesses de 30 mi/h (48 km/h) et plus. Nous soulignons pour notre part que si les klaxons en bordure de voie mis à l'essai s'étaient avérés efficaces, cela voudrait dire que les klaxons de locomotives émettent des signaux d'une intensité beaucoup plus élevée que nécessaire.

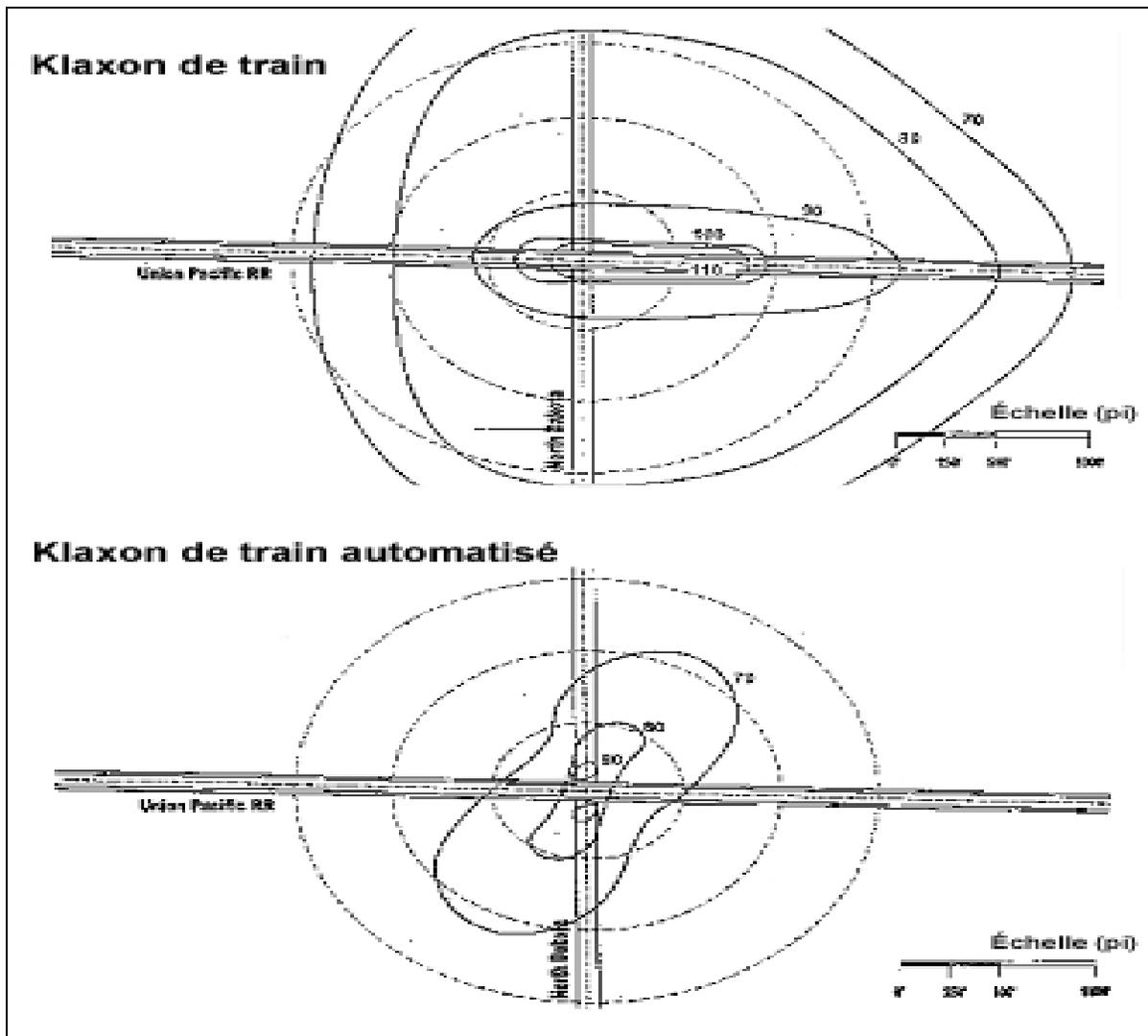


Figure B.1 Courbes d'intensité acoustique de klaxons embarqués et en bordure de voie

Source : Gent et coll., 1999

Autre aspect intéressant des travaux sur les klaxons en bordure de voie, le fait que les klaxons aient été asservis au système de signalisation du passage à niveau. D'aucuns craignent que lier l'activation du klaxon et l'activation du système normal de protection du passage à niveau nuise à la sécurité. En effet, aujourd'hui, le klaxon de locomotive est clairement associé à un train, et malgré cela, beaucoup de gens font fi des feux et des barrières. S'il fallait que le klaxon devienne un simple dispositif dans la panoplie des dispositifs de signalisation du passage à niveau, il serait à craindre que les automobilistes se mettent à ne pas tenir compte du klaxon de la même manière qu'ils contournent les barrières. Il faudra faire un arbitrage entre, d'une part, les fausses alarmes et l'imprévisibilité associées à un klaxon asservi au système de signalisation du passage à niveau et, d'autre part, la possibilité d'alarmes manquées, si le klaxon est sous la responsabilité du mécanicien de locomotive.

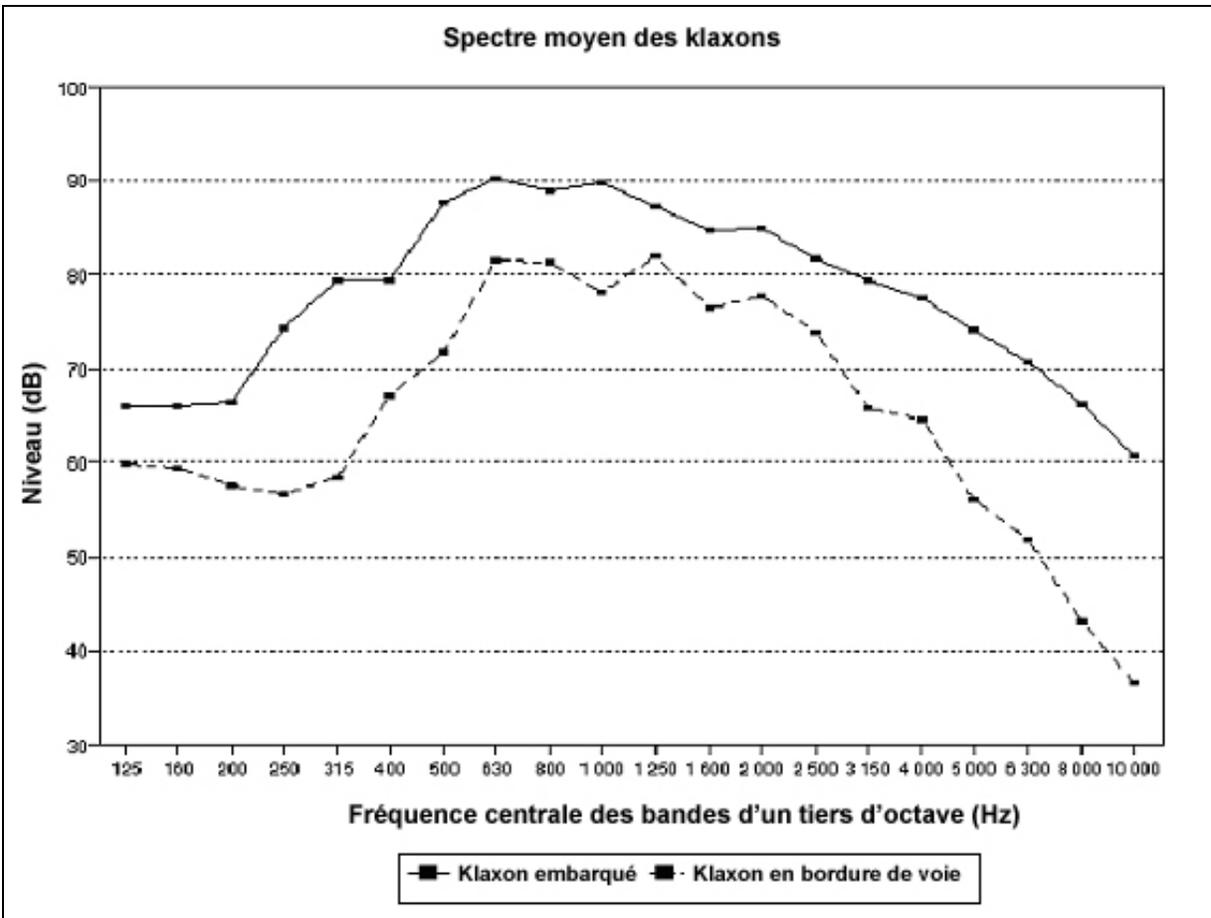


Figure B.2 Spectres de fréquences associés aux klaxons de locomotives et aux klaxons en bordure de voie

Source : Multer et Rapoza, 1998

RÉFÉRENCES

- Gent, Steve J., Scott Logan, and David Evans, *Evaluation of an Automated Horn Warning System at Three Highway-Railroad Grade Crossings in Ames, Iowa*, (www.dot.state.ia.us), 1999.
- Multer, J., and A. Rapoza, *Field Evaluation of a Wayside Horn at a Highway-Railroad Grade Crossing*, DOT-VNTSC-FRA-97-1, June 1998.
- Rapoza, A., and E.J. Rickley, *The Safety of Highway Railroad Grade Crossings: The Effectiveness of Railroad Horn Systems*, Report No. DOT/FRA/ORD-95/XX, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Washington, DC, 1995.
- Rapoza, Amanda S., Thomas G. Raslear, and Edward J. Rickley, *Railroad Horn Systems Research*, DOT-VNTSC-FRA-98-2, U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Washington, DC, January 1999.

ANNEXE C

**Règle de la Federal Railroad Administration des États-Unis
pour accroître la visibilité des locomotives**

Les chemins de fer américains utilisent, depuis quelques années, divers systèmes de feux auxiliaires. La figure C.1 illustre une locomotive Amtrak 40PH équipée de deux feux à éclats Star 200BC montés sur le toit et d'un autre feu à éclats monté entre les deux plaques à numéros. Le klaxon à 5 cornets est lui aussi bien visible.



Figure C.1 Configuration des feux à éclats sur une locomotive Amtrak

Photo de Dick Leonhardt (source – www.trainweb.com)

La Federal Railroad Administration des États-Unis a mené des études pour évaluer l'efficacité des feux à éclats et d'autres types de feux à accroître la visibilité d'une locomotive [Carroll et coll., 1995], avant de promulguer une règle à ce sujet. Les essais sur le terrain comparaient le rendement d'un phare avant seul et celui d'un phare avant combiné à chacun des trois types de feux suivants :

1. *feux de croisement* clignotants alignés directement avec la voie;
2. *phares de fossé* continus à faisceau orienté à 15 degrés vers l'extérieur;
3. deux *feux à éclats* montés sur la locomotive.

Voici les principaux résultats de ces essais :

- Les trois combinaisons phare-feux auxiliaires ont surclassé le phare seul : dans les trois cas, le train pouvait être détecté de beaucoup plus loin et l'observateur était mieux en mesure d'évaluer le temps qu'allait prendre le train pour arriver au passage à niveau. Pour ce qui est de la distance de détection, les feux de croisement ont affiché les meilleures performances, suivis des phares de fossé et des feux à éclats.
- Les feux à éclats produisent des effets intéressants, notamment lorsqu'ils sont installés en paire, mais la présence généralisée de feux à éclats et de feux oscillants sur les véhicules d'urgence fait qu'ils sont moins efficaces en tant que dispositif distinctif d'annonce de l'approche d'un train. De plus, les feux à éclats se confondent avec l'arrière-fond le jour et lorsqu'il fait nuit, la multiplicité des sources lumineuses peut affaiblir leur capacité à attirer l'attention. La recherche révèle en outre que les feux de croisement et les phares de fossé – les feux auxiliaires les plus largement utilisés aux États-Unis – semblent eux aussi afficher un bon rendement, tant dans des conditions expérimentales qu'en service réel.

- Pour ce qui est de l'estimation du délai avant l'arrivée du train, ce sont les feux de croisement qui ont mené aux erreurs les plus faibles, soit de 7 à 22 secondes. Mais les phares de fossé ont eux aussi facilité l'estimation. À noter qu'au cours des essais sur le terrain, les observateurs portaient un casque d'écoute pour masquer le bruit de la locomotive qui s'approchait.
- Bien que limitées, les données accidentologiques donnent à penser que le recours aux feux de croisement peut entraîner une diminution de plus de 50 % des taux d'accidents.

Le libellé de la règle est présenté en C.1, ci-après. Lors de l'élaboration de la nouvelle règle [Federal Register, 1995] la FRA notait :

[TRADUCTION]

La FRA estime que l'uniformisation de la configuration des feux sur les locomotives fera en sorte que le public pourra se familiariser avec l'aspect d'une locomotive qui s'approche et ainsi la reconnaître rapidement. Une configuration de trois feux montés à l'avant (définie dans la règle provisoire comme comportant, outre le phare avant, des «phares de fossé» ou des «feux de croisement») est le système le plus couramment adopté par l'industrie ferroviaire depuis la mise en place de la première règle provisoire en 1993. Ces trois feux forment un triangle dont l'une des principales dimensions (la base ou la hauteur) mesure au moins 60 pouces. L'œil normal peut discerner deux objets comme étant séparés lorsque ceux-ci sont disposés de façon à former un angle visuel d'environ un demi-degré. Lorsque les feux sont vus comme séparés, l'observateur est mieux en mesure d'évaluer la vitesse d'un train qui s'approche, car à mesure que la locomotive se rapproche, les feux semblent se distancer. Avec un espace de 60 pouces entre eux, les feux semblent séparés à 572 pieds de l'observateur. Au delà de 572 pieds, les feux sont habituellement vus comme un seul feu. Cette distance correspond à un temps d'approche de 13 secondes pour un train qui se déplace à 30 milles à l'heure, ou de 6,5 secondes pour un train qui se déplace à 60 milles à l'heure.

Compte tenu du caractère courant et pratique du système triangulaire à trois feux, de la désirabilité de conférer un aspect distinctif à une locomotive qui s'approche, et des avantages matériels qu'offre ce système, la FRA estime qu'il s'agit là du système de feux le mieux en mesure de répondre aux besoins de la présente règle.

La FRA ajoute plus loin :

[TRADUCTION]

Selon les chiffres auxquels la FRA a eu accès, environ 7 946 locomotives sont présentement équipées de feux auxiliaires qui sont conformes au projet de règle. Quelque 52,84 p. 100 de ces locomotives sont dotées de feux clignotants. Les autres, soit 47,16 p. 100, de feux continus. En supposant que l'industrie continue d'installer des feux auxiliaires selon cette même proportion de feux clignotants et continus, la FRA estime que les coûts de tels systèmes de feux atteindront environ 97 millions de dollars au cours des 20 prochaines années. Bien que les spécifications visant les feux clignotants et les

feux continus différent, il n'existe pas de données qui permettraient d'établir quel système de feux est le plus efficace. En supposant qu'ils sont aussi efficaces l'un que l'autre, pour justifier des dépenses à hauteur de 97 millions de dollars, les feux auxiliaires doivent permettre de prévenir en moyenne au moins 11 accidents par année. Or, la FRA estime que, sur vingt ans, les feux auxiliaires préviendront environ 6 300 accidents (avec 1 493 tués et 3 056 blessés), dont le coût est évalué à 2,424 milliards de dollars.

Annexe C.1

[TRADUCTION]

Règle de la Federal Railroad Administration des États-Unis pour accroître la visibilité des locomotives

Source : *Federal Register*, volume 60, numéro 166, 1995

Règlement de la FRA, art. 229.125 Phare avant et feux auxiliaires. * * * * *

- d)* À compter du 31 décembre 1997, toute locomotive de tête devra, pour franchir un ou plusieurs passages à niveau publics à une vitesse supérieure à 20 milles à l'heure, être équipée de feux auxiliaires fonctionnels, en plus du phare avant exigé aux termes du paragraphe *a)* ou *b)* du présent article. Une locomotive équipée au [date de la publication de la règle finale] de feux auxiliaires conformes aux dispositions de l'article 229.133 sera réputée être conforme aux exigences du présent article jusqu'au [jour du quatrième anniversaire de la publication de la règle finale].

Les feux auxiliaires doivent répondre aux spécifications ci-après.

- (1) Deux feux auxiliaires blancs placés à l'avant de la locomotive de manière à former un triangle avec le phare avant.
 - (i) Les feux auxiliaires doivent être à au moins 36 pouces de hauteur au-dessus du sommet du rail, sauf dans le cas des locomotives MU (composées de plusieurs unités) et des locomotives de commande, car un tel emplacement pourrait compromettre l'intégrité de la caisse ou causer des inconvénients d'autres natures. Les feux auxiliaires sur les locomotives MU et les locomotives de commande doivent être à au moins 24 pouces au-dessus du sommet du rail.
 - (ii) Les feux auxiliaires doivent être à au moins 36 pouces l'un de l'autre si la distance verticale entre le phare avant et l'axe horizontal des feux auxiliaires est de 60 pouces ou plus.
 - (iii) Les feux auxiliaires doivent être à au moins 60 pouces l'un de l'autre si la distance verticale entre le phare avant et l'axe horizontal des feux auxiliaires est inférieure à 60 pouces.
- (2) Chaque feu auxiliaire doit produire au moins 200 000 candelas.

- (3) Les feux auxiliaires doivent être orientés de manière que leur faisceau décrive un angle d'au plus 15 degrés avec l'axe de la locomotive.
- e) Les feux auxiliaires exigés aux termes du paragraphe *d)* du présent article peuvent être des feux continus ou des feux qui clignotent à l'approche d'un passage à niveau. S'il s'agit de feux clignotants, ils doivent clignoter alternativement à un rythme d'au moins 40 et d'au plus 180 clignotements par minute, pendant au moins les 20 secondes précédant l'entrée de l'avant du train dans le passage à niveau. Le clignotement peut s'activer automatiquement, mais il doit pouvoir être activé et désactivé manuellement par le mécanicien.
- f) Les feux auxiliaires exigés aux termes du paragraphe *d)* du présent article doivent être allumés au plus 20 secondes avant l'arrivée de la locomotive à un passage à niveau public.
- g) Pour la sécurité des personnes se trouvant sur l'emprise ferroviaire, notamment des employés et des sous-traitants de la **compagnie de chemin de fer**, les compagnies de chemin de fer peuvent, à leur discrétion,
- (1) faire fonctionner les feux auxiliaires même lorsque la vitesse au franchissement du passage à niveau est inférieure à 20 milles à l'heure, et
 - (2) allumer les feux auxiliaires de la locomotive à d'autres moments qu'à l'approche d'un passage à niveau public.
- h) Lorsque seulement l'un des feux auxiliaires prescrits et le phare avant d'une locomotive sont fonctionnels après que le train a quitté son terminal d'origine, la locomotive peut poursuivre sa route en tant que locomotive équipée jusqu'au prochain point où le feu non fonctionnel pourra être réparé. Si aucun des feux auxiliaires prescrits n'est fonctionnel, la locomotive peut circuler uniquement si les dispositions de l'article 229.9 sont respectées.

Donald M. Itzkoff, Deputy Federal Railroad Administrator. [FR Doc. 95-21143 Filed 8-25-95; 8:45 am]

Références

Carroll, Anya A., Jordan Multer, and Stephanie H. Markos, *Safety of Highway-Railroad Grade Crossings: Use of Auxiliary External Alerting Devices to Improve Locomotive Conspicuity*, DOT-VNTSC-FRA-95-10, July 1995.

Federal Register, Volume 60, Number 166 [Page 44457-44463], *Locomotive Visibility: Minimum Standards for Auxiliary Lights*, Department of Transportation, Federal Railroad Administration 49 CFR Part 229 August 28, 1995.

ANNEXE D

**Expériences en laboratoire
sur la détection et l'urgence apparente du signal**

D.1 AUDIBILITÉ DE SONS PURS DANS UN VÉHICULE, EN PRÉSENCE DE BRUIT

Cette expérience visait à déterminer les domaines de fréquences les plus facilement audibles en présence du bruit masquant caractéristique de l'intérieur d'un véhicule. Des signaux de sons purs ont été présentés à des sujets. Ces signaux résultaient de la combinaison de huit fréquences et six niveaux d'intensité par rapport au bruit masquant. Les huit fréquences en question couvrent la bande spectrale dans laquelle les klaxons de locomotives actuels peuvent produire une énergie substantielle (de 261 Hz à 4 000 Hz).

Sujets

Neuf sujets ont été recrutés à l'Université Queen's et dans la région de Kingston, en Ontario. Le groupe comprenait quatre femmes et cinq hommes de 18 à 40 ans (moyenne d'âge de 25,8 ans). Tous se sont déclarés otologiquement normaux. Ils ont d'ailleurs détecté tous les signaux d'essai, lorsque diffusés dans une ambiance calme. Leur participation leur a valu une rétribution sous forme de crédit universitaire ou d'un montant en espèces.

Appareillage

Chambre d'essai

Une chambre insonorisée a servi aux essais. Le schéma de la figure D.1 présente la configuration de la chambre et de l'équipement installé à l'intérieur.

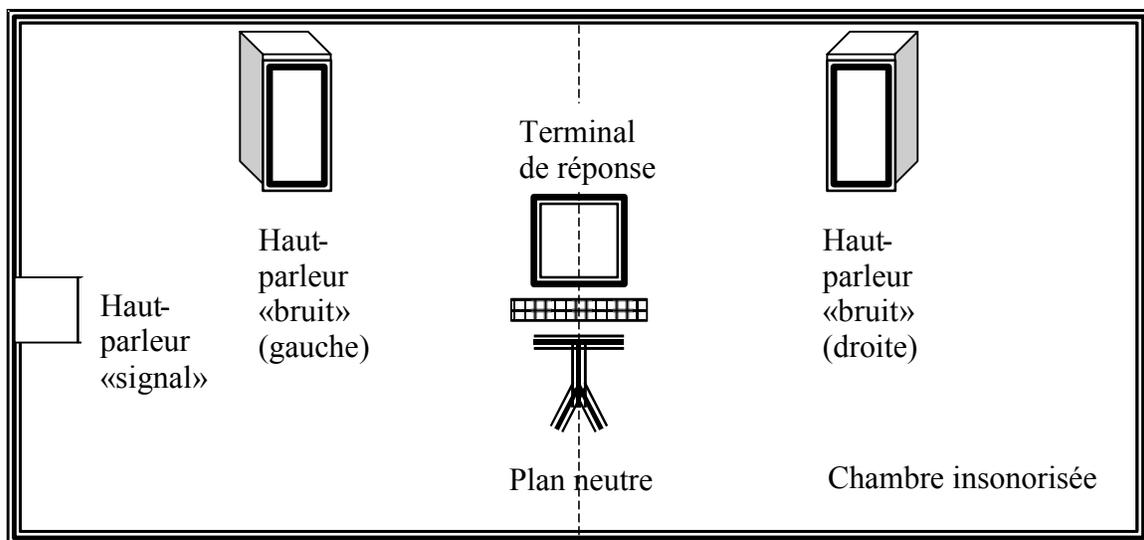


Figure D.1 Schéma de la chambre d'essai

Le sujet était assis au milieu de la pièce, sur un tabouret à hauteur réglable, devant un terminal. Deux haut-parleurs diffusaient le bruit masquant. Ils étaient posés sur des supports à une hauteur de 0,5 m au-dessus du plancher, à 2 m du sujet et de chaque côté de celui-ci, à un angle de 45 degrés par rapport au plan neutre (emplacement du sujet). Un seul haut-parleur diffusait

le signal. Il était posé sur un support à 1 m au-dessus du plancher, à 3 m à gauche du sujet, perpendiculairement au plan neutre.

Bruit masquant

Le bruit masquant a été modélisé d'après le spectre moyen du bruit ambiant à l'intérieur d'une automobile, tel que rapporté par Rapoza et coll. [1999]. Pour que le bruit masquant puisse se rapprocher du spectre moyen, un bruit blanc a été généré par itération, puis enregistré et filtré depuis le point d'audition du sujet. Ce processus itératif était interrompu dès que la différence entre le spectre enregistré et le spectre moyen était inférieure à 0,5 dB, dans n'importe quelle bande d'un tiers d'octave couvrant la gamme des fréquences de 31,5 à 10 000 Hz. Le bruit blanc a été produit par un PC Macintosh Power exécutant le logiciel SoundEdit16 (Macromedia, 2000) et projeté par un amplificateur NAD 3020A branché à des haut-parleurs B & W. Il a été enregistré et filtré à l'aide d'un ordinateur IBM Pentium exécutant le logiciel CoolEdit (Syntrillium, 2000). Le niveau global d'intensité du bruit masquant à l'oreille du sujet était d'environ 85 dB.

Signaux

Quarante-huit signaux de sons purs d'une durée de 1 s, représentant huit fréquences (261, 400, 500, 562, 630, 1 000, 2 000, 4 000 Hz) et six niveaux d'intensité par rapport au bruit masquant (0, -3, -6, -9, -12, -15 dB), ont été utilisés. Le niveau d'intensité de chacun des 48 signaux (en dB) est montré au tableau D.1. Les signaux ont été présentés aux sujets à l'aide du logiciel Judge (Nyvalla, 1998) tournant sur un ordinateur IBM PENTIUM doté d'une carte son 16 bits reliée à un moniteur Fostex 6301.

Tableau D.1 Niveau d'intensité des signaux d'essai (dB)

Intensité par rapport au masque	261 Hz	400 Hz	500 Hz	562 Hz	630 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz
0 dB	57,8	53,2	50,2	48,9	46,6	43,8	36,2	30,2
-3 dB	54,2	50,4	47,5	46,6	44	40,7	33,7	26,8
-6 dB	51,8	47	44,6	43,3	40,5	37,5	30	24,2
-9 dB	48,1	44,1	41,3	39,8	37,9	34,9	27,4	21,1
-12 dB	45,8	41,3	39,1	36,8	35	32,1	24,4	18,3
-15 dB	42,2	38,2	35,7	33,6	32	29,4	21,4	15,1

Protocole

La hauteur du tabouret était réglée de façon que la distance entre le plancher et le milieu de la tête du sujet soit de 1,5 m. Les sujets avaient été prévenus qu'ils allaient avoir à détecter des signaux dans un bruit masquant. Pour les familiariser avec la tâche, l'expérimentateur leur a présenté un échantillon de signaux et de «non-signaux» en présence du bruit masquant, le tout accompagné de ses commentaires. Les sujets ont ensuite reçu la consigne de répondre par 1 = «Oui» ou 2 = «Non», après chaque essai, à la question suivante : «Y avait-il un signal dans cet essai?». Il ont été avertis qu'il y avait autant d'essais comportant un signal que d'essais qui n'en comportaient pas. Ils répondaient sur le clavier du terminal. Chacun des 48 signaux était

présenté dix fois, ce qui donnait 480 signaux, en plus d'un nombre équivalent de «non-signaux» (essais-pièges). Les essais étaient menés selon un ordre aléatoire indépendant pour chaque sujet.

Résultats et discussion

Le taux de fausses alarmes (c.-à-d. la fraction des «oui» aux essais-pièges) a été faible ($M = 0,025$, *Écart type* = 0,1) et aucun sujet n'a dépassé 0,01. En raison de ce faible taux de fausses alarmes, les analyses subséquentes n'ont tenu compte que des taux de succès (c.-à-d. le pourcentage de «oui» aux essais comportant un signal).

La figure D.2 présente le taux de succès moyen de l'ensemble des sujets en fonction de la fréquence et du rapport signal/bruit. Les taux de succès moyens ont été soumis à une analyse de variance intrasujet. L'effet principal de l'intensité était significatif, $F(5, 40) = 19,30$, $p < 0,0001$.

Comme on le voit à la figure D.2, les taux de succès augmentent avec le rapport signal/bruit. L'effet principal de la fréquence était significatif, $F(7, 56) = 5,89$, $p < 0,0001$. Toujours à la figure D.2, les taux de succès sont particulièrement élevés au milieu du domaine de fréquences, atteignant un sommet au centre, à 562 Hz. L'interaction entre l'intensité et la fréquence s'est également révélée significative, $F(35, 280) = 2,51$, $p < 0,0001$. Cette interaction s'explique par le fait que les signaux de fréquence moyenne ne représentent un avantage que lorsque les rapports signal/bruit sont peu élevés. En effet, des essais ultérieurs ont révélé que la variabilité des taux de succès en fonction de la fréquence n'était pas significative pour des rapports signal/bruit de -9 dB ou plus.

L'avantage des signaux de fréquence moyenne lorsque le rapport signal/bruit est faible pourrait s'expliquer par un compromis entre deux facteurs psychoacoustiques. Premièrement, les sujets sont surtout sensibles aux signaux de haute fréquence, en particulier ceux compris entre 2 000 Hz et 4 000 Hz (Fletcher & Munson, 1933). Deuxièmement, les études sur l'effet de masque ont montré que les signaux haute fréquence sont particulièrement sujets à l'effet de masque en présence d'un bruit à large bande (Egan et Hake, 1950; Zwicker et Fastl, 1990). Il se peut qu'au cours de la présente expérience, le puissant effet de masque créé par le bruit de fréquence basse ait été amplifié par le spectre du bruit masquant, fortement incliné vers les basses fréquences. Ainsi, les signaux de fréquence moyenne auraient mené à des taux de succès élevés, car ils étaient plus audibles que les signaux de fréquence basse, mais aussi moins sujets au masquage, que les signaux de fréquence haute.

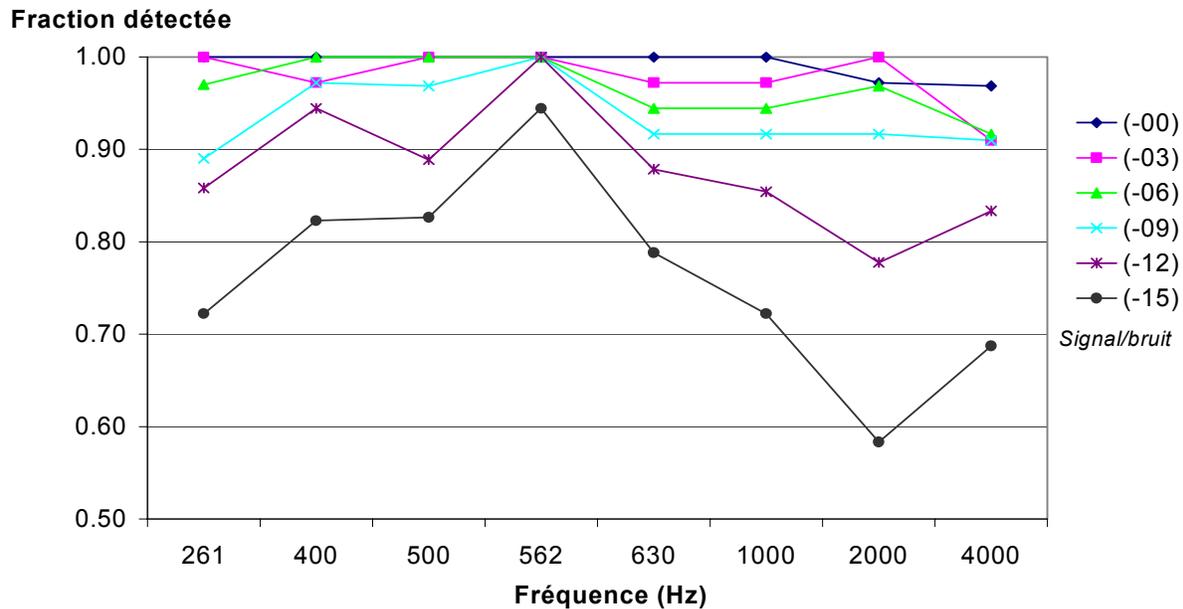


Figure D.2 Taux de succès moyen en fonction de la fréquence et du rapport signal/bruit

D.2 URGENCE APPARENTE DES SIGNAUX DE SONS PURS DANS UN VÉHICULE, EN PRÉSENCE DE BRUIT

Des essais antérieurs ont montré que l'urgence apparente des signaux de sons purs varie en fonction de la fréquence et de l'intensité du signal (Hellier et coll., 1993). La présente expérience avait pour but d'examiner si cette variabilité se vérifie en présence de bruit, à l'intérieur d'une automobile.

Sujets

Onze sujets ont été recrutés à l'Université Queen's et dans la région de Kingston, Ontario. Le groupe comprenait huit femmes et trois hommes de 17 à 39 ans (moyenne d'âge de 25,5 ans). Tous se sont déclarés otologiquement normaux. Ils ont d'ailleurs détecté tous les signaux d'essai, lorsque diffusés dans une ambiance calme. Leur participation leur a valu une rétribution sous forme de crédit universitaire ou d'un montant en espèces.

Appareillage

L'environnement d'essai et le bruit masquant étaient les mêmes que pour l'expérience 1 (voir la section D.1). Les 12 signaux d'essai résultaient de la combinaison de quatre fréquences (500, 1 000, 2 000, 4 000 Hz) et de trois niveaux d'intensité établis par rapport à un seuil (0, 3, 6 dB). Pour déterminer le seuil à une fréquence donnée, il fallait que le taux de succès soit d'au moins 0,9, selon la définition de succès donnée à l'expérience 1. Ainsi peut-on observer, à la figure D.2, que le seuil S/B pour un signal de 500 Hz est de -9 dB.

Protocole

Comme dans la première expérience, la hauteur du tabouret était réglée de façon que la distance du plancher au milieu de la tête du sujet soit toujours de 1,5 m. La tâche consistait à évaluer l'urgence apparente des signaux par une méthode d'estimation de la grandeur dite à «module libre» (sur une échelle non graduée), adaptée de Hellier et coll. (1995). Les sujets ont été informés qu'ils auraient à évaluer le caractère urgent associé à des signaux qui seraient diffusés en même temps qu'un bruit masquant. Ils ont reçu les consignes suivantes :

[TRADUCTION]

Des sons vous seront présentés, sans ordre précis. Votre tâche consistera à indiquer dans quelle mesure ils vous semblent urgents en déplaçant la barre coulissante. Après avoir entendu le premier son, indiquez le degré d'urgence auquel vous l'associez – donnez la cote que vous pensez la plus appropriée. Lorsque votre choix est fait, passez au son suivant en appuyant sur le bouton NEXT. La cote d'urgence maximale est située à l'extrême droite de la barre coulissante et à l'inverse, la cote d'urgence minimale, à l'extrême gauche. Essayez de faire en sorte que les rapports entre les cotes que vous attribuez aux différents sons reflètent les rapports entre l'urgence des sons. Autrement dit, essayez d'attribuer des cotes proportionnelles à l'urgence du son telle que vous la percevez.

Chaque son était entendu deux fois. L'ordre des essais était aléatoire et indépendant pour chaque sujet.

Résultats et discussion

Une valeur entière de 1 à 100 a été attribuée à toutes les cotes, selon la dernière position à laquelle avait été laissée la barre coulissante au terme de chaque essai. La figure D.3 donne la cote moyenne de l'urgence associée aux 12 signaux, en fonction de la fréquence et du niveau d'intensité par rapport au seuil.

Les cotes d'urgence ont été soumises à une analyse de variance intrasujet. L'effet principal de la fréquence était significatif, $F(3, 30) = 7,55$, $p < 0,001$. Les cotes les plus élevées ont été associées aux hautes fréquences. L'effet principal de l'intensité par rapport au seuil était, encore là, significatif, $F(2, 20)$. De la même façon, les cotes étaient d'autant plus élevées que l'intensité du signal était élevée par rapport au seuil. L'interaction entre les deux facteurs n'était pas significative.

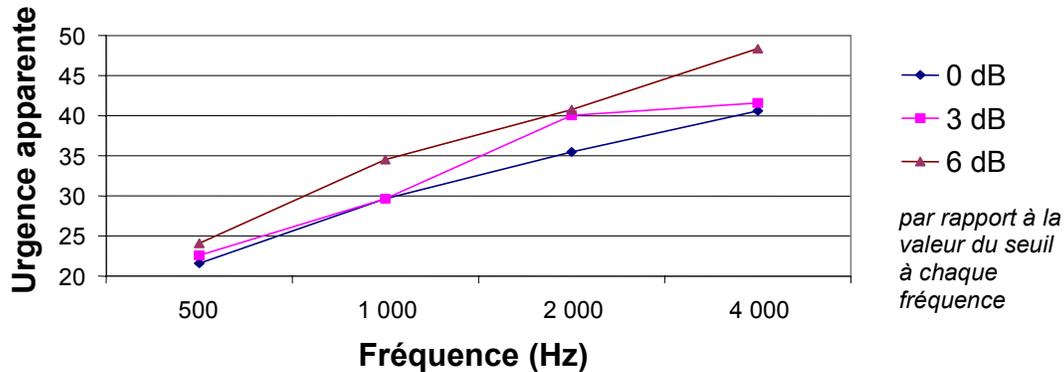


Figure D.3 Urgence moyenne en fonction de la fréquence et de l'intensité par rapport au seuil

D.3 URGENCE APPARENTE ASSOCIÉE AUX KLAXONS À CORNETS MULTIPLES

Les résultats de la deuxième expérience (D.2) peuvent mener à conclure qu'en modifiant la fréquence et l'intensité du signal d'un klaxon, on peut influencer sur son urgence apparente. L'expérience présentée ci-après visait à déterminer si des facteurs acoustiques et psychoacoustiques autres que les caractéristiques de fréquence et d'intensité des cornets font varier l'urgence apparente des signaux émis.

Sujets

Quatorze sujets ont été recrutés à l'Université Queen's et dans la région de Kingston, Ontario. Le groupe comprenait neuf femmes et cinq hommes de 17 à 45 ans (moyenne d'âge de 24,5 ans). Tous se sont déclarés otologiquement normaux. Leur participation leur a valu une rétribution sous forme de crédit universitaire ou d'un montant en espèces.

Appareillage

L'environnement d'essai était le même que celui décrit à l'expérience 1 (D.1). Les ingrédients de base étaient sept enregistrements de cornets de klaxons de locomotives. Les spectres des cornets étaient comparables, mais leur fréquence fondamentale différait : 311, 370, 415, 440, 470, 494, 622 Hz. L'intensité de chaque cornet était réglée de manière que la force des signaux au point d'audition du sujet était égalisée à 66 dBC. Ces cornets ont été agencés pour former 23 klaxons nouveaux. Ces 23 klaxons représentaient toutes les combinaisons de 3, 4 et 5 cornets possibles dans la largeur de bande fixée. La largeur de bande des klaxons devait répondre à une seule contrainte : dans tous les cas, le cornet fréquence basse devait émettre dans une fréquence de 311 Hz et le cornet fréquence haute, dans une fréquence de 622 Hz. Malgré leur intensité et leur largeur de bande uniformes, ces klaxons nouveaux variaient selon d'autres caractéristiques importantes – en particulier, le nombre de cornets, le centroïde spectral (c.-à-d. la médiane du spectre pondérée en amplitude) et la dissonance musicale.

La dissonance musicale de chaque klaxon nouveau a été déterminée ainsi : premièrement, des intervalles entre les composantes des signaux produits par le klaxon nouveau étaient définis;

deuxièmement, la valeur de dissonance associée à chaque intervalle a été calculée par regroupement des valeurs correspondantes de quatre échelles de dissonance établies par Krumhansl (1990); enfin, on a admis, comme valeur de dissonance musicale du klaxon nouveau, la moyenne de toutes les valeurs de dissonance. Pour valider cette valeur, on a demandé à quatre personnes ayant une formation en musique de coter la dissonance musicale du son produit par chaque klaxon nouveau. La moyenne de leurs cotes concordait avec les valeurs de dissonance calculées, $r(21) = 0,82$, $p < 0,0001$.

Protocole

Le protocole était identique à celui de la deuxième expérience (D.2).

Résultats et discussion

Une valeur entière de 1 à 100 a été attribuée à toutes les cotes, selon la dernière position à laquelle avait été laissée la barre coulissante au terme de chaque essai. Le tableau D.2 donne les paramètres acoustiques et psychoacoustiques de chaque klaxon nouveau, de même que les cotes moyenne d'urgence.

Les cotes d'urgence moyennes se sont établies de 37,40 (ÉT = 6,12) à 72,02 (ÉT = 4,68). Pour évaluer l'influence relative du nombre de cornets, du centroïde spectral et de la dissonance musicale sur l'urgence apparente, les chercheurs ont réalisé une analyse de régression multiple sur les cotes moyennes d'urgence. Il en est résulté un modèle qui explique 63 % de la variance, $F(3, 19) = 10,57$, $p < 0,00026$. Ce modèle donne à penser qu'il est possible d'accroître l'urgence associée aux sons émis par les klaxons de locomotives sans intervenir sur leur intensité (dBC) ou leur bande spectrale, mais en ajoutant des cornets (BÊTA = 0,39), en haussant le centroïde spectral (BÊTA = 0,60) et/ou en augmentant la dissonance musicale (BÊTA = 0,37).

Pour être bien sûrs que les résultats de cette expérience ne dépendaient pas des propriétés de la chambre d'essai ou de l'emplacement du son, les expérimentateurs ont repris l'expérience en utilisant cette fois des casques d'écoute. Tous les cornets étaient égalisés à une même intensité dans les casques d'écoute (à 66 dBC) et recombinaisonnés pour produire 23 klaxons nouveaux. Le modèle décrit ci-dessus (nombre de cornets, centroïde spectral et dissonance) était encore une fois très significatif, expliquant 76 % de la variance, $F(3, 19) = 20,51$, $p < 0,0001$, tous les coefficients bêta étant significatifs ($p < 0,05$). Ces résultats suggèrent que l'on peut accroître l'urgence associée aux signaux de klaxons de locomotives sans en changer l'intensité (en dBC) ou la bande spectrale, mais en haussant le centroïde spectral et peut-être aussi en ajoutant des cornets et/ou en accentuant la dissonance musicale. Une autre expérience s'impose pour déterminer la contribution respective des facteurs «nombre de cornets» et «dissonance musicale» à l'urgence apparente, en manipulant indépendamment ces deux variables. Il est toutefois raisonnable de conclure que l'augmentation du nombre de cornets en même temps que de la dissonance musicale accentue l'urgence apparente.

Tableau D.2 Paramètres acoustiques et psychoacoustiques de chaque klaxon, et cote moyenne d'urgence

Nouveau klaxon	Cornets	Centroïde spectral	Valeur de dissonance musicale	Cote d'urgence	
				Haut-parleurs	Casque d'écoute
1	3	4 650	-0,64	37,40	27,55
2	3	4 694	-1,07	38,86	29,1
3	3	4 657	-0,35	46,63	35,69
4	3	4 619	-1,07	47,15	35,35
5	3	4 716	-0,61	66,42	49,25
6	4	4 697	-0,48	47,93	45,75
7	4	4 658	-0,25	51,89	45,61
8	4	4 626	-0,68	48,83	35,22
9	4	4 710	-0,5	62,57	51,24
10	4	4 683	-0,14	50,80	51,42
11	4	4 664	-0,7	54,01	39,28
12	4	4 737	-0,59	68,85	50,82
13	4	4 623	-0,14	50,85	53,96
14	4	4 705	-0,11	68,47	66,06
15	4	4 695	-0,27	65,25	53,97
16	5	4 466	-0,05	41,06	48,42
17	5	4 663	-0,43	48,73	43,78
18	5	4 718	-0,39	64,99	57,46
19	5	4 654	0,02	55,28	61,21
20	5	4 709	-0,04	72,02	60,8
21	5	4 671	0,15	65,20	67,78
22	5	4 629	-0,17	54,58	51,85
23	5	4 688	-0,32	68,34	60,86

D.4 IDENTIFICATION DE KLAXONS DE LOCOMOTIVES

Le but de cette expérience était de documenter empiriquement le taux d'identification de différents klaxons de locomotives, dans une ambiance sonore caractéristique de l'intérieur d'un véhicule.

Sujets

Dix-sept sujets ont été recrutés à l'Université Queen's ainsi que dans la région de Kingston, en Ontario. Le groupe comprenait 11 femmes et six hommes de 17 à 45 ans (moyenne d'âge de 25,7 ans). Tous se sont déclarés otologiquement normaux. Leur participation leur a valu une rétribution sous forme de crédit universitaire ou d'un montant en espèces.

Appareillage

L'environnement d'essai était le même que celui décrit à l'expérience 1 (D.1). Les signaux comprenaient trois sons d'avertissement qui n'étaient pas produits par des klaxons (sirène de police, sirène d'ambulance, sonnerie d'approche), deux enregistrements sur le terrain de klaxons de véhicules autres que des locomotives (camion, voiture), deux enregistrements sur le terrain de klaxons de locomotives (VIA Rail, GO Transit), et les trois signaux de klaxons de locomotives synthétisés au cours de l'expérience 3 (klaxons 3, 6 et 21). Les sons de ces trois derniers klaxons étaient respectivement associés à une urgence minimale, moyenne et maximale. Tous les signaux étaient présentés en présence du bruit masquant décrit à l'expérience 1.

Protocole

Chaque son était présenté une seule fois. Les sujets devaient les identifier librement. On les avait prévenus qu'ils auraient à identifier des signaux d'avertissement dans une ambiance sonore semblable à celle dans laquelle on se trouve au volant d'un véhicule. Aucun indice particulier ne leur indiquait que les sons avaient quelque chose à voir avec des passages à niveau ou des klaxons de locomotives. Ils inscrivaient leurs réponses sur un bloc-note.

Résultats et discussion

La figure D.4 illustre le taux d'identification de chaque klaxon en tant que klaxon de locomotive, que klaxon d'un véhicule autre qu'une locomotive, ou qu'un autre dispositif sonore. Les enregistrements de klaxons de locomotives réels ont plus souvent été identifiés comme klaxons de locomotives que les signaux de klaxons synthétisés, même si le taux était bien en deçà de 100 % (65 % pour GO Transit et 59 % pour VIA Rail). Les signaux de klaxon synthétisés ont été plus souvent identifiés comme klaxons de locomotives que les signaux de klaxons d'autres véhicules. Il importe de noter que les taux d'identification des trois signaux de klaxons de locomotives synthétisés étaient assez comparables (24 % par rapport à 35 %). Ce résultat donne à penser que pour la gamme des paramètres de klaxons traités au cours de la présente étude, il n'y a pas de concordance entre l'urgence apparente et l'identifiabilité du signal. Il est plausible que les taux d'identification élevés des klaxons de locomotives réels soient partiellement dus à des indices qui n'ont rien à voir avec la source comme telle (p. ex., filtrage environnemental, décalage Doppler).

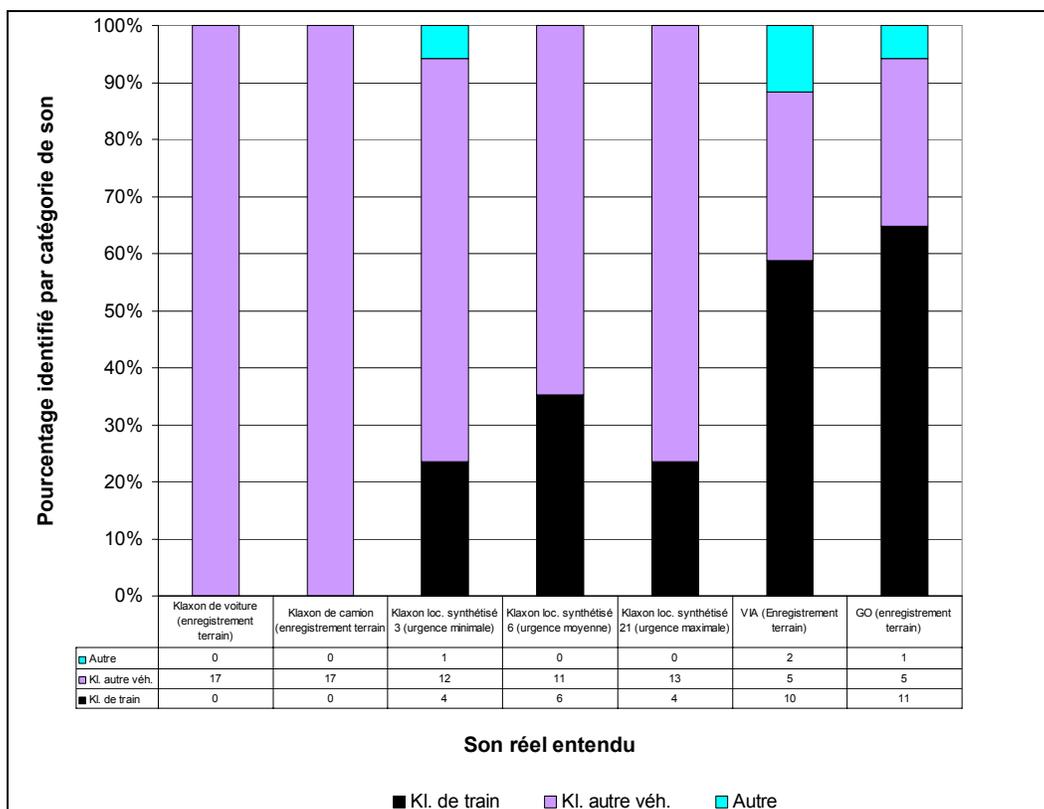


Figure D.4 Identification des sons de klaxons de locomotives

Références

- Egan, J.P., and H.W. Hake, "On the masking pattern of a simple auditory stimulus", *Journal of the Acoustical Society of America*, 22, 622-630, 1950.
- Fletcher, H., and W.A. Munson, "Loudness, its definition, measurement and calculation", *Journal of the Acoustical Society of America*, 5, 82-108, 1933.
- Hellier, E., J. Edworthy, and I. Dennis, "Improving auditory warning design: Quantifying and predicting the effects of different warning parameters on perceived urgency", *Human Factors*, 35, 693-706, 1993.
- Hellier, E., J. Edworthy, and I. Dennis, "A comparison of different techniques for scaling perceived urgency", *Ergonomics*, 38, 659-670, 1995.
- Krumhansl, C.L., *Cognitive Foundations of Musical Pitch*, Oxford University Press: Oxford, England, 1990.
- Macromedia Inc., *SoundEdit 16*, 600 Townsend Street, San Francisco, CA 94103, 2000.
- Nyvalla DSP AB, *Judge SOUNDSWELL Signal Workstation*, Åldermansvägen 19-21, SE-17148 Solna, Sweden, 1998.
- Rapoza, Amanda S., Thomas G. Raslear, and Edward J. Rickley, *Railroad Horn Systems Research*, DOT-VNTSC-FRA-98-2, January 1999.
- Syntrillium Software, *CoolEdit*, P.O. Box 62255, Phoenix, AZ 85082-2255, 2000.
- Zwicker, E., and H. Fastl, *Psychoacoustics – Facts and Models*, Springer-Verlag: Berlin, Germany, 1990.

ANNEXE E

**Locomotives utilisées pour les essais en service payant
et quelques mesures choisies**

E.1 Photos de locomotives montrant l'emplacement du klaxon



Locomotive Genesis – klaxon surélevé



Locomotive F59 de West Coast Express – emplacement normal du klaxon



SD-40



Dash-9



GP-9

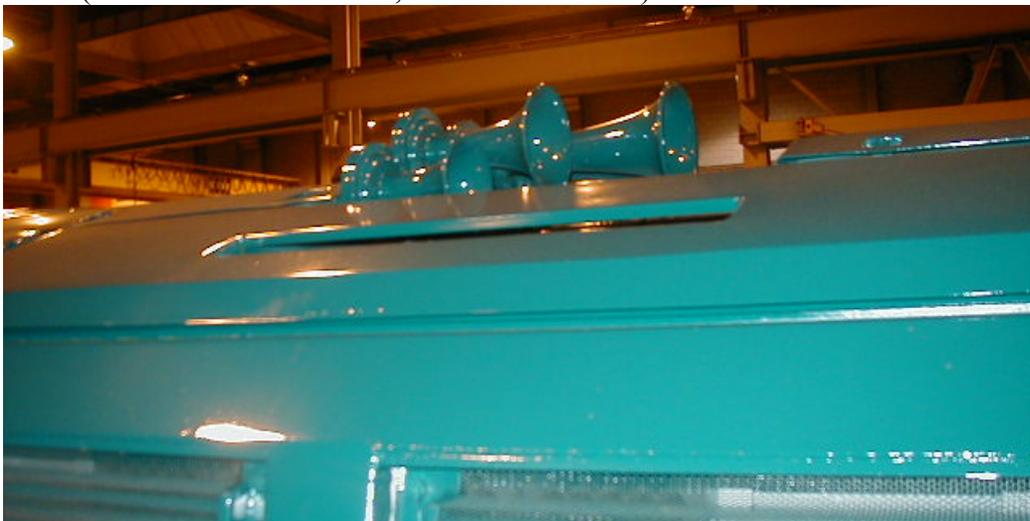
Photos de cette page prises par Shane Stewart (stewart.railfan.net)



F40 (Photo de Shane Stewart, stewart.railfan.net)

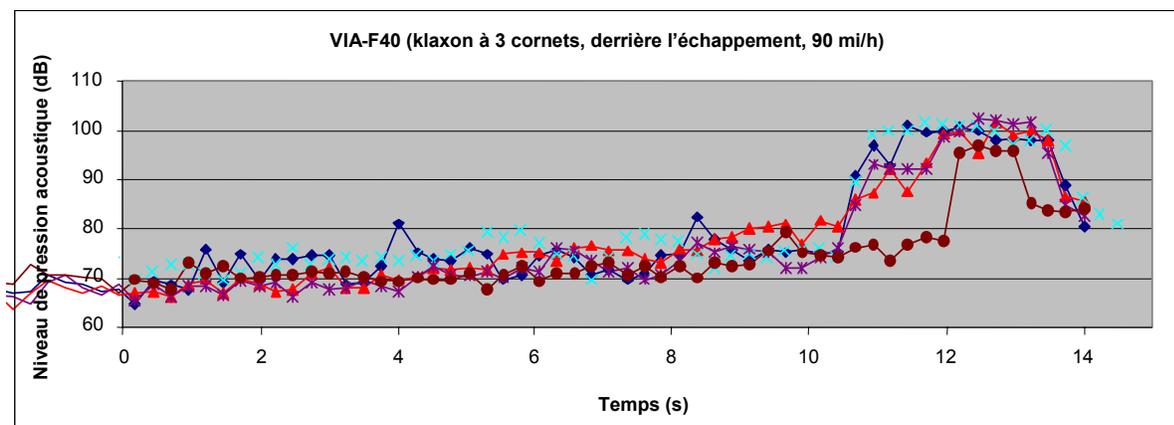
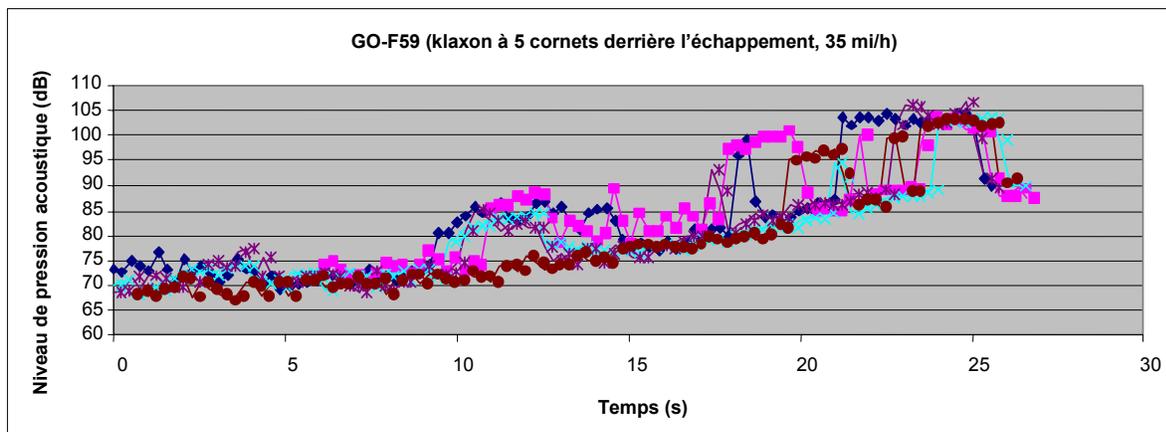
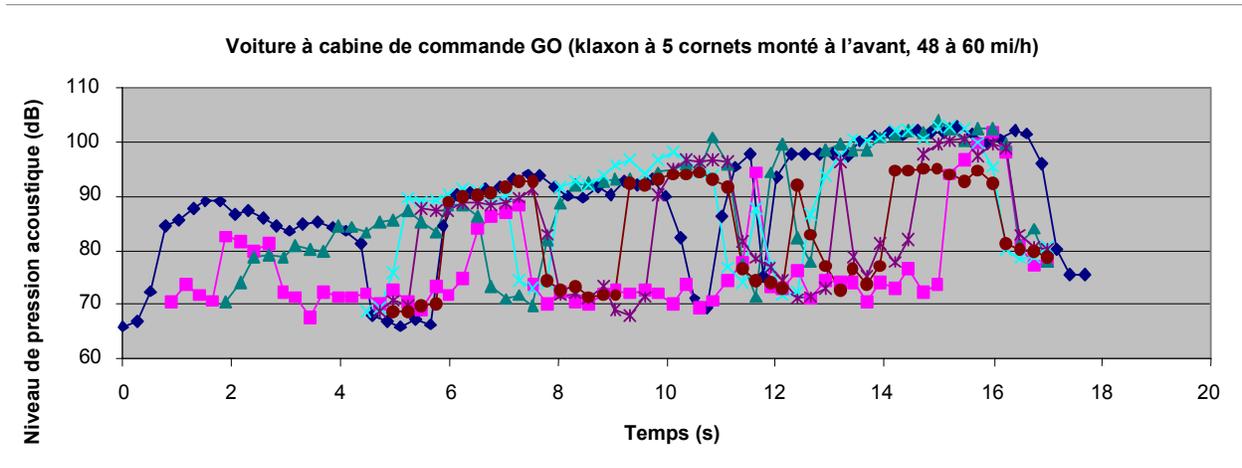


LRC (Photo de Shane Stewart, stewart.railfan.net)



Locomotive Genesis – emplacement normal du klaxon

E.2 Mesures acoustiques au passage à niveau South Blair - train à 400 m



ANNEXE F

Klaxon hypothétique à diagramme conformé

Cette étude examine les effets qu'aurait sur les collectivités la mise en place d'un klaxon hypothétique à 3 cornets, à diagramme conformé (de type *Pattern Control*). La figure F.1 illustre l'efficacité d'un modèle d'un tel klaxon à réduire le niveau sonore dans la gamme de fréquences de 400 à 10 000 Hz. Sur l'axe vertical sont portés les degrés de rotation par rapport à la direction avant (vers la voie, dans le cas qui nous occupe). Les courbes indiquent l'angle de rotation à partir duquel le niveau sonore est réduit de 6 dB. Ces courbes illustrent l'effet sur les plans horizontal (sur les riverains) et vertical (dans la cabine).

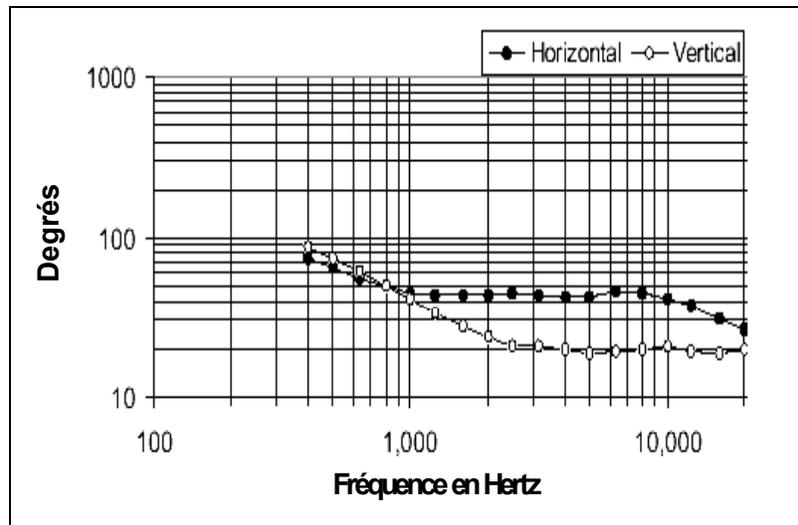


Figure F.1 Largeur de faisceau (pour une décroissance de 6 dB)

Source : *Community Professional Loudspeakers, Brochure # HD242-991020.*

Nous avons évalué l'effet d'un hypothétique klaxon ferroviaire à diagramme conformé en supposant que les caractéristiques du dispositif illustré à la figure F.1 peuvent être réalisées dans une application ferroviaire. La figure F.2 illustre l'effet d'un tel klaxon sur le rendement en fonction de la fréquence, pour le spectre caractéristique du klaxon à 3 cornets. L'effet est calculé à 90 degrés et à 91 m (en admettant une atténuation de 7 dB par doublement de la distance). D'un spectre à crête large entre 500 et 1 250 Hz, on obtient un spectre dont le sommet se situe à 400 Hz. Non seulement cette fréquence est-elle plus «agréable à entendre», mais le niveau sonore global est réduit, passant de 95 à 84 dBA.

La figure F.3 illustre la réduction du niveau sonore pondéré en A. On peut noter que la distance latérale à laquelle le seuil de nuisance, soit 75 dBA, est atteint passe de 580 m à environ 210 m. Comme les trains circulent dans les deux sens, les effets seront variables selon l'endroit. Ainsi, un personne qui habite à côté du poteau commandant de siffler constatera une grande diminution du niveau sonore des klaxons actionnés à la hauteur de ce poteau, mais ne verra aucun changement pour ce qui est des trains circulant en sens inverse.

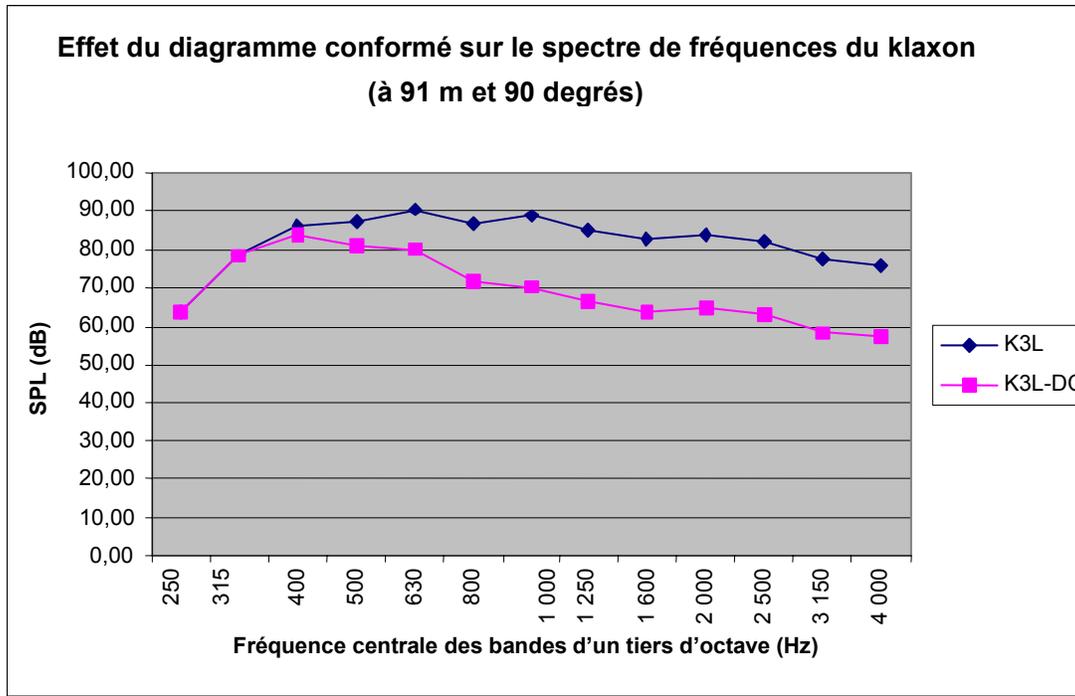


Figure F.2 Effet du diagramme conformé sur le spectre du klaxon à 90 degrés

Nous avons évalué l'effet le long de la voie à une distance latérale fixe de 600 m, en supposant un nombre égal de trains dans les deux sens. Nous avons calculé le niveau d'exposition sonore (SEL) dans le cas d'un train circulant à 60 mi/h et émettant un signal conforme à la règle 14 (L)(ii) (2 coups longs, un coup bref et un coup long), de sorte que le sifflement occupait 11 des 15 secondes de l'approche du train. La figure F.4 illustre les résultats.

Comme nous supposons une circulation équivalente dans les deux sens, l'effet de l'autre côté du passage à niveau est, en principe, le miroir de celui qui est montré. On peut voir que, même si le niveau d'exposition sonore diminue partout, c'est tout près du passage à niveau qu'il diminue le plus. Il convient de rappeler, concernant les valeurs SEL, que celles-ci résultent de l'intégration du SPL sur une période, et non d'un SPL moyen. Aussi les SEL sont-ils plus élevés que le niveau sonore de crête atteint au cours de la séquence du klaxon. À noter également que les trains lents, menant à des durées d'exposition longues, produisent des valeurs SEL plus élevées que les trains rapides, associés à des durées d'exposition courtes.

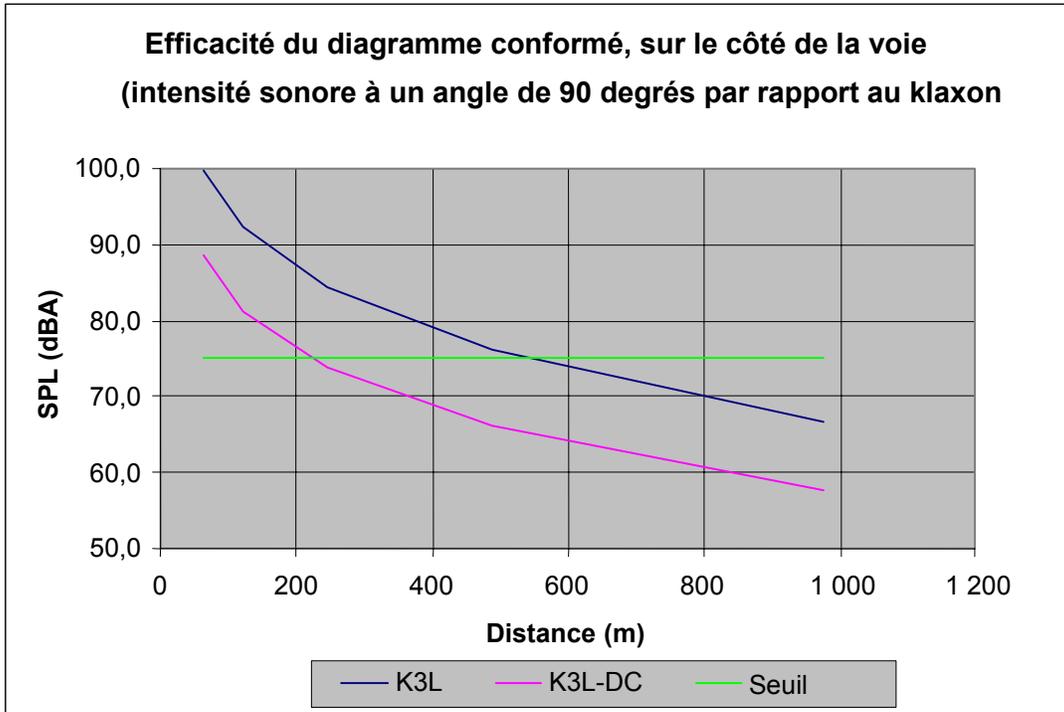


Figure F.3 Effet sur le bruit à une distance latérale croissante de la voie

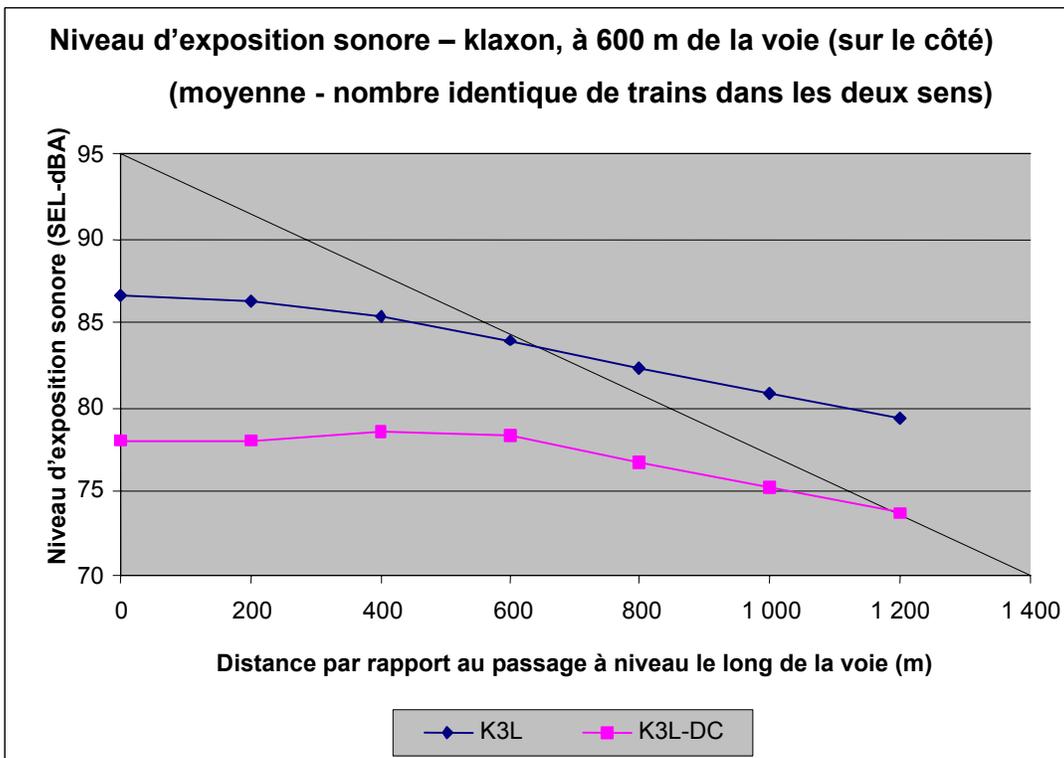


Figure F.4 Comparaison de l'effet sur le bruit selon le niveau d'exposition sonore

La dernière mesure de l'effet sur les collectivités est le niveau sonore jour-nuit (L_{dn}). Aux fins du calcul des L_{dn} , nous avons adopté certains aspects de la procédure utilisée par la FRA (feuille de calcul *horn model*, site Web de la FRA [www.fra.dot.gov]) dans son évaluation de l'impact environnemental de la proposition de rétablir le sifflement des trains là où il avait été aboli. La FRA pose comme hypothèse que le bruit produit par le train (sans compter le signal du klaxon) fait partie du bruit ambiant et qu'il s'ajoute au niveau sonore de base L_{eq} . Selon son analyse des mesures acoustiques passées, le L_{eq} correspondant au bruit du train au passage à niveau est d'environ 10 dB inférieur au L_{eq} du klaxon.

Nous avons ajouté ce chiffre au L_{dn} de base pour tenir compte de l'augmentation de la fréquence des trains et nous avons évalué l'effet à un endroit situé à une distance de 300 m du passage à niveau, à un angle de 90 degrés par rapport à la voie. Nous avons supposé des nombres égaux de trains dans chaque sens et autant de trains le jour que la nuit, circulant tous à 60 mi/h et équipés de klaxons produisant des valeurs SEL conformes aux données ci-dessus. La figure F.5 illustre l'effet résultant d'un klaxon à rayonnement conformé sur le bruit dans la collectivité, en fonction de l'augmentation de la fréquence des trains. On peut voir que le klaxon hypothétique a un effet sur la fréquence des trains à laquelle le seuil d'effet *important* est atteint : cette fréquence passe de 10 trains par jour à 45 trains par jour.

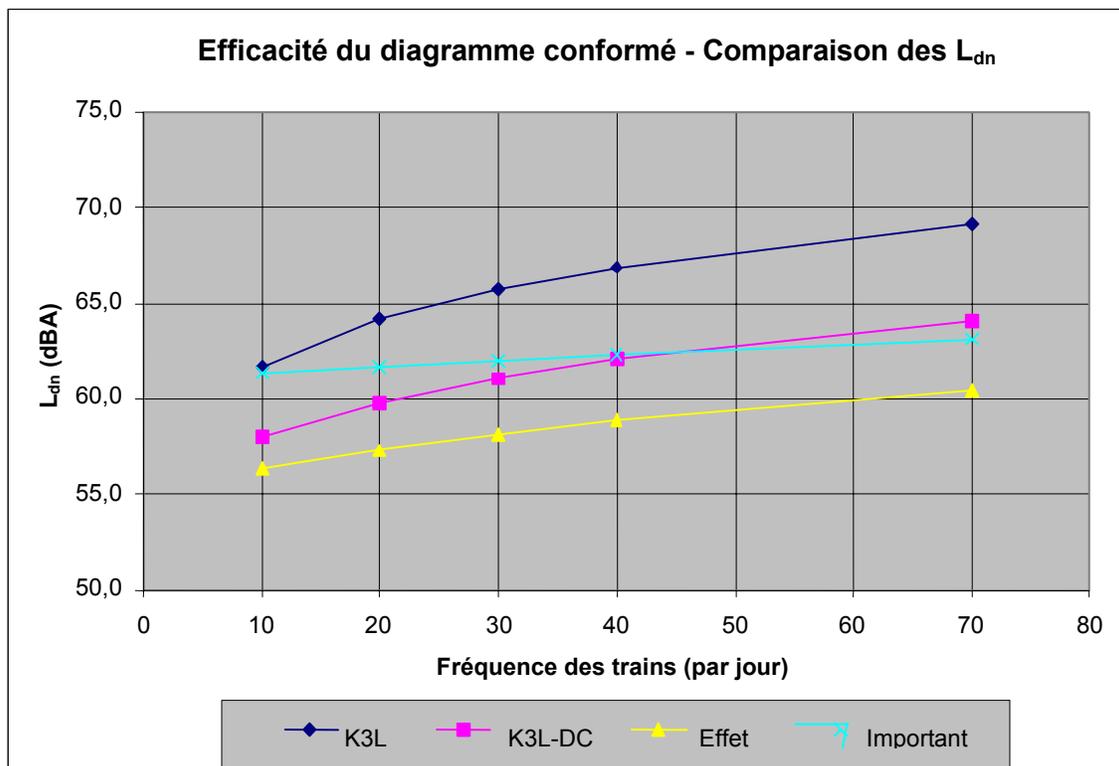


Figure F.5 Effet sur le L_{dn} en fonction de la fréquence des trains